

海底重力計の製作と実海域試験

Development and field experiment of an ocean bottom gravimeter

大熊茂雄¹・駒澤正夫¹・押田 淳²

Shigeo Okuma¹, Masao Komazawa¹ and Atsushi Oshida²

Abstract: A new ocean bottom gravimeter has been developed to better understand the subsurface structure of the transition zone of the Japanese coastal areas. The gravimeter consists of a Scintrex CG-5 gravimeter as a gravity sensor with free gimbals suspensions and a data logger within a pressure-resistant spherical container made from titanium. Observation data can be recorded to the data logger at a frequency of 6 Hz. A field experiment for the gravimeter was conducted in February 2010 in the Kaneda Bay of the Miura Peninsula, Kanagawa Pref. Gravity measurements were carried out at three gravity stations on the sea floor at depths from 20 to 40m below sea level. The observation data were retrieved from the data logger after the short cruise of the experiment. Tilt and temperature corrections were made for them after a conversion from raw data to relative gravity values from the base station at the port. The absolute observed gravity values were finally determined by tying to absolute gravity stations. All measured gravity data were referred to the Japan Gravity Standardization Net 1975 (JGSN75) and normal gravity values were calculated according to the Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Bouguer, terrain and other corrections were made by the standard procedure of gravity data processing at the Geological Survey of Japan (SPECG1988). The Bouguer and terrain corrections were carried out as an effect of bounded spherical crust and actual topographic undulation relative to the spherical surface, respectively, within the same distance range of 60 km. The density for both Bouguer and terrain corrections is taken to be 2.3 g/cm³. Bouguer anomalies at the gravity stations on the sea floor seem to conform in amplitude with regional gravity anomalies compiled mainly by shipborne gravity surveys.

Keywords: ocean bottom gravimeter, sea floor gravity survey, Kaneda bay, Miura peninsula, Bouguer anomalies

要旨

本邦沿岸海域の海底地下構造を調査するため、新たに海底重力計を製作した。当該の海底重力計は、チタン合金製の球状耐圧容器内に収納された、ジンバルによる水平保持機能を施したシントレックス社製 CG-5 陸上用重力計からなるセンサー部とデータを収録するデータロガーから構成されている。重力の測定はオフラインで 6Hz の周期で行われ、測定値はデータロガーに記録される。

新たに製作した海底重力計の実海域試験を、2010 年 2 月に神奈川県三浦半島金田湾で行った。重力測定を水深約 20~40m の 3 箇所の海底で実施した。測定データについて、傾斜および温度補正を行い、調査基地とした横須賀港三笠棧橋の基準点に対する相対重力値が計算された。その後、絶対重力値既知点との閉

合測定により、各測点での絶対重力値を求めた。これらの処理は日本重力基準網 1975 (JGSN 1975) に基づき行われ、正規重力は測地基準系として GRS1980 系を採用している。ブーゲー補正、地形補正およびその他の補正が、各測点から 60km 以内の球殻と地形起伏の効果として計算された。仮定密度 2.3g/cm³ を仮定したブーゲー異常値を計算し既存の重力図と比較したところ、整合的な結果が得られ、当該装置の性能を検証できた。

1. はじめに

産業技術総合研究所では、平成 20 年度から開始された政策予算「沿岸域の地質・活断層調査—陸海接合の物理探査」において、沿岸域の重力データ空白域で新たにデータを取得することにより、陸海域にわたる詳細な重力異常図を作成し、データの解析から断層構

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) (Kawasaki Geological Engineering Co., LTD)

造に係わる基盤構造を推定する研究に着手した。

平成 20 年度には、能登半島北部沿岸域で他機関所有の海底重力計を借用して海底重力調査を実施した。当該調査では、観測データと既往の陸上および船上重力データと併せて編集することにより、精緻な重力異常分布を求め、浅海域での重力異常の急変部と断層分布とが良い一致を示すことを明らかにした(駒澤ほか, 2009)。当該調査は、沿岸域の基盤構造調査における海底重力調査の有効性を示す好例となった。

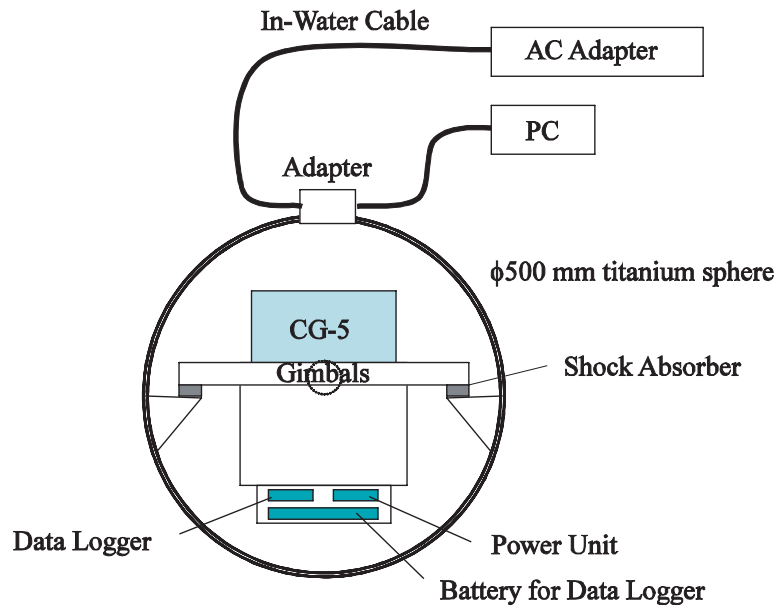
そこで、平成 21 年度は、より効率的な調査を可能

とするため、独自に海底重力計を製作し、以後の沿岸海域での調査に備えることとした。また、海底重力計の完成後、実海域での試験を行い、所定の測定が行えるかを確認した。本報では、海底重力計の製作と実海域試験の結果の概要について報告する。

2. 海底重力計の製作

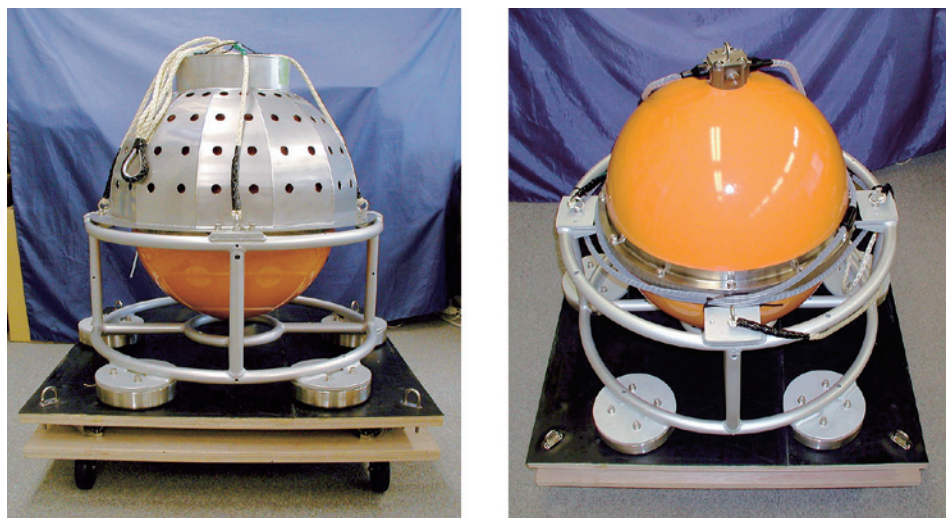
今回製作した海底重力計のポンチ絵と写真を各々第 1 図と第 2 図に、その仕様を第 1 表に示す。

本海底重力計は、チタン合金からなる直径 50cm (内



第 1 図 製作した海底重力計のポンチ絵。

Fig.1 Schematic diagram of the new ocean bottom gravimeter.



第 2 図 製作した海底重力計の外観 (写真)。

左：耐圧容器保護カバー付，右：同カバー無し。

Fig.2 Photos of the new ocean bottom gravimeter.

Left is the gravimeter with a hat on it. Right is the one without a hat.

第 1 表 製作した海底重力計の主な仕様.

Table 1 Outline of the new ocean bottom gravimeter.

●海底重力測定装置(全体)	
外 形	高さ 733mm×最大外径 φ 880mm(移動台車は含まない)
空中重量	約 130kg
水中重量	約 45kg
耐圧容器内機器総重量	22kg
使用水深	～200m
使用温度	45℃以下(耐圧容器内部温度)
使用時間	最大 24 時間 (通常 18 時間以下)
製作	川崎地質 (株)
●重力センサー	
型 式	Scintrex CG-5 (customized)
通信方式	RS-232C
データ出力	6Hz 連続テキストデータ
内部バッテリー	リチウムイオン”スマートバッテリー”, 11.1V 6Ah × 2 個
●レベリング機構	
方式	パッシブジンバル
ダンパー	密閉型オイルダンパー
精 度	±360 秒角以内
最大補償角度	±30 度(回転軸方向), ±35 度(対角方向)
●データロガー	
C P U	C8051F340
時 計	RTC 精度: ±1 秒/日
通信ポート	RS232C×2ch
記録メディア・容量	SD メモリーカード, 2GB
バッテリー	リチウムイオン電池
●耐圧容器	
球殻外径	φ 500mm
空中重量	45kg
材 質	チタン合金(64AT 相当)
耐 圧	水深 6,000m 相当
●架台(錘付)	
材 質	フレーム部: アルミ製(A5052)アルマイト仕上げ, 脚部(錘): ステンレス(SUS304)
空中重量	38.2 kg (6.44 kg(錘)×5+6 kg(フレーム))
●耐圧容器保護カバー	
材 質	ステンレス(SUS304)
重 量	16.73 kg

径 48cm) の球状耐圧容器の中に, 緩衝吸収材により衝撃を緩和した 2 軸のジンバルを置き, これに重力計測部としてカナダ・シントレックス社の CG-5 を取り付けたものである. 重力の測定は, オフラインで, 耐圧容器の中に設置されたデータロガーで行い, 重力計測部から 6Hz で出力される生データ (重力相当値, 傾斜値, 温度) がメモリーカードに記録される. 電源

としては, バッテリー (CG-5 内蔵バッテリーおよびデータロガー用バッテリー) が用いられ, 耐圧容器外の AC アダプターを経由した外部電源供給によって充電される.

海底重力の測定は, 概ね 200m 以浅の浅海域で行われるが, 耐圧容器の部材としてチタン合金 (64AT 相当) を使用しており, 材質的には最大 6,000m まで

の耐圧性能がある。

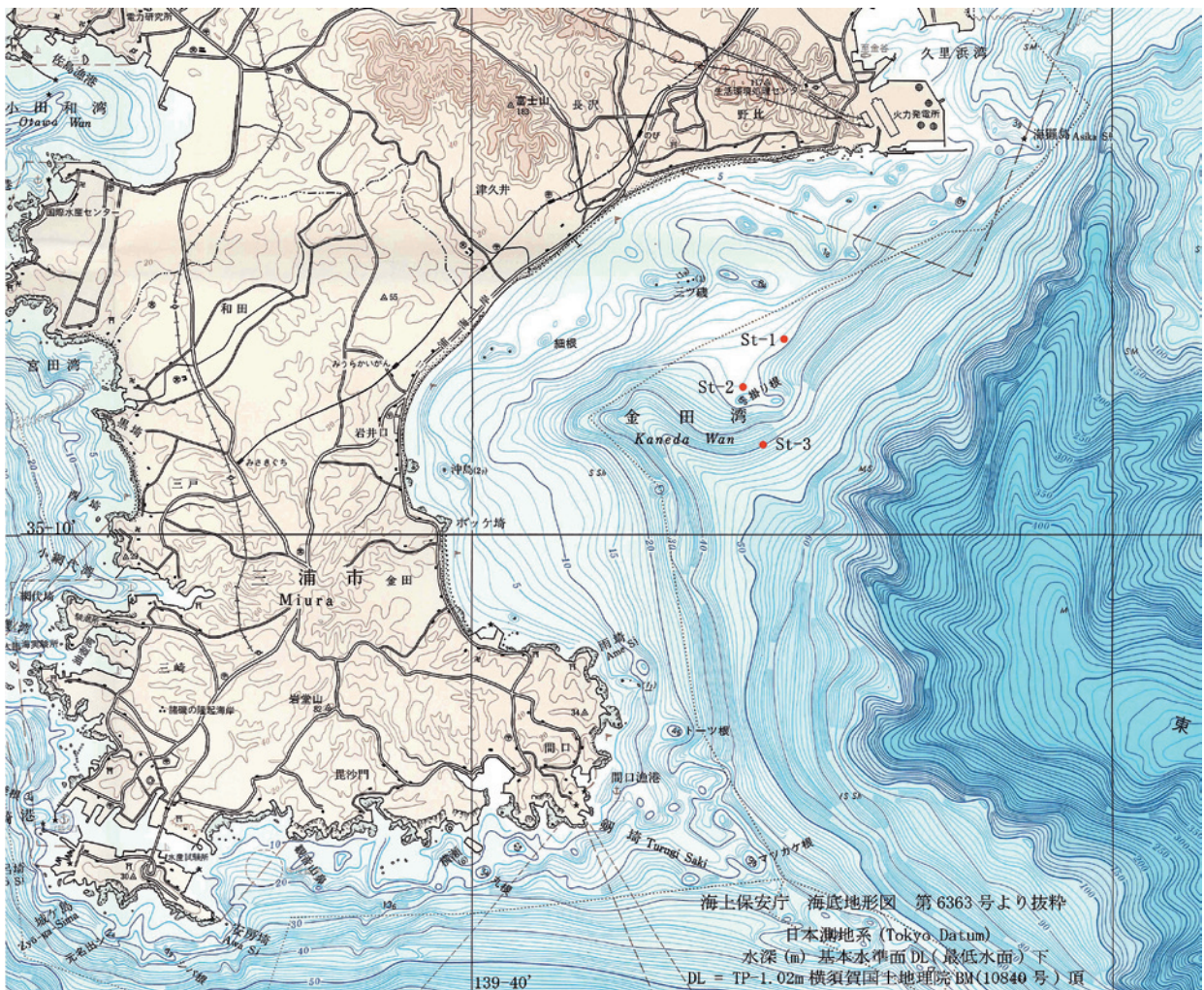
耐圧容器の下部には海底での機器の設置安定性を図るための架台が、上部には海中投入時につり下げロープや錘からの衝撃などの不測の事態から耐圧容器を守るための耐圧容器保護カバー（ハット）が取り付けられており、海底重力計全体の空中重量は約 100kg となっている。ジンバルによる重力計測部のレベル補正は、最大補正角が± 30 度以上で、静定時の鉛直との差（精度）は± 60 秒角以内となっている。

3. 実海域試験

今回製作した海底重力計の性能を確認するため、実海域試験を行った（第 3 図）。調査の概念図を第 4 図に、調査仕様を第 2 表に示す。調査は、2010 年 2 月 22 日に神奈川県三浦半島金田湾の水深 100m 以浅の海域で行った。

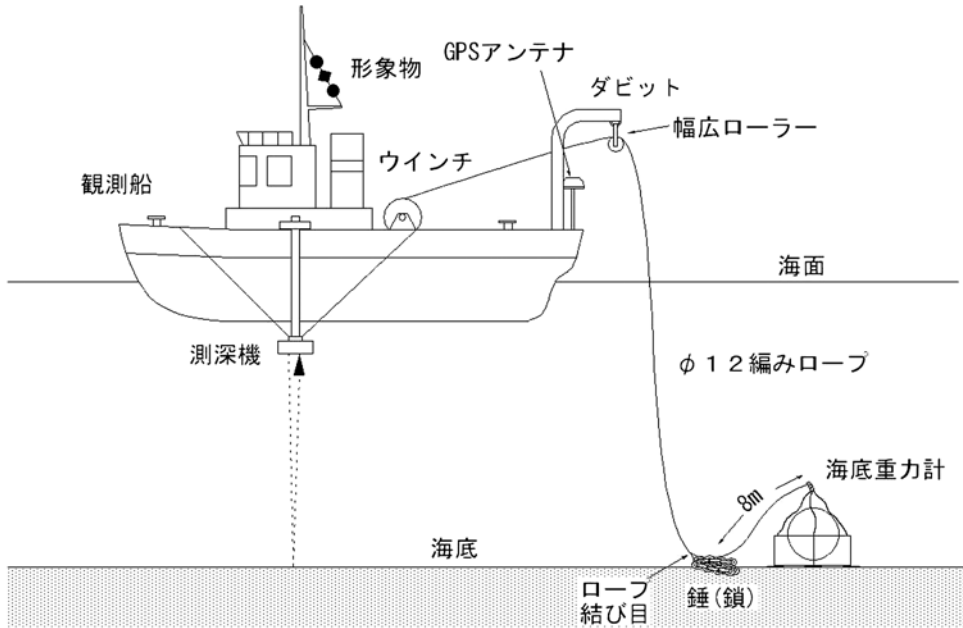
調査は、神奈川県横須賀港新港埠頭三笠栈橋を基点とし、艀装した 19 トンの小型船舶に今回新たに製作した海底重力計を搭載して航行し、3 箇所の観測点で海底重力計をダビットおよびウインチを用いて海中に投入し、着底後、重力測定を行った。測定時間は約 10 分であった。また、栈橋付近に仮基準点を設けて、出港前および帰港後に閉塞処理のための重力測定を行っている。さらに、海底重力計で測定するのはあくまで重力の相対値のため、陸上用重力計を用いて栈橋の基準点で重力測定を行い、絶対値が既知の点からの重力値の接続を行い、最終的に重力の絶対値を計算している。

船位の測定は、デファレンシャル GPS（以下 DGPS）システムを用いて測定した。本試験における補正情報は、海上保安庁の DGPS 局「劔埼」を使用した。この DGPS データを PC ソフトで表示して、海底



第 3 図 測点位置図。
赤丸が測点位置を示す。

Fig.3 Location of observation points.
Red solid circles indicate gravity stations on the sea floor.



第4図 海底重力測定概念図.

Fig.4 Schematic diagram of ocean bottom gravity measurements of this experiment.

第2表 海底重力計の実海域試験の仕様.

Table 2 Outline of the field experiment of the ocean bottom gravimeter.

試験日	2010年2月22日
試験海域	神奈川県三浦半島金田湾 (第3図参照)
測定数量	海域3点(水深100m以浅)の相対重力測定および出港前, 帰港後の岸壁基準点での相対重力測定
使用船舶	ヴェルニーⅢ (第235-44904号)
総トン数	19トン
船舶の長さ	17.81m
測定位置標定	DGPS
調査基地	神奈川県横須賀港三笠栈橋
岸壁基準点	横須賀港三笠栈橋猿島航路発券所付近 35°17'03"N, 139°40'28"E, 1.22mASL
使用機材	<p><u>船上測定装置</u></p> <p>重力計: 産総研型海底重力計</p> <p>DGPS: Trimble DMS232 GPS Receiver</p> <p>誘導装置: マリメックス・ジャパン(株) 船位誘導ソフト</p> <p>音響測深器: 千本電機(株) 精密音響測深機 PDR-1200型 周波数 200kHz, 測深精度 $\pm(0.03+\text{水深}/1000)\text{m}$, 測定水深最大 130m</p> <p><u>陸上測定装置</u></p> <p>重力計: ラコスト陸上用重力計 G304</p>
請負機関	川崎地質(株)

重力計着底時の緯経度を記録した。

本試験における水深は、音響測深機を用いて測定した。現場で得られた音響測深記録は、吃水（きっすい）補正、水中音速補正および潮位補正を行い、最終的に陸の標高と同じ東京湾平均海面を基準とする水深を求めた。

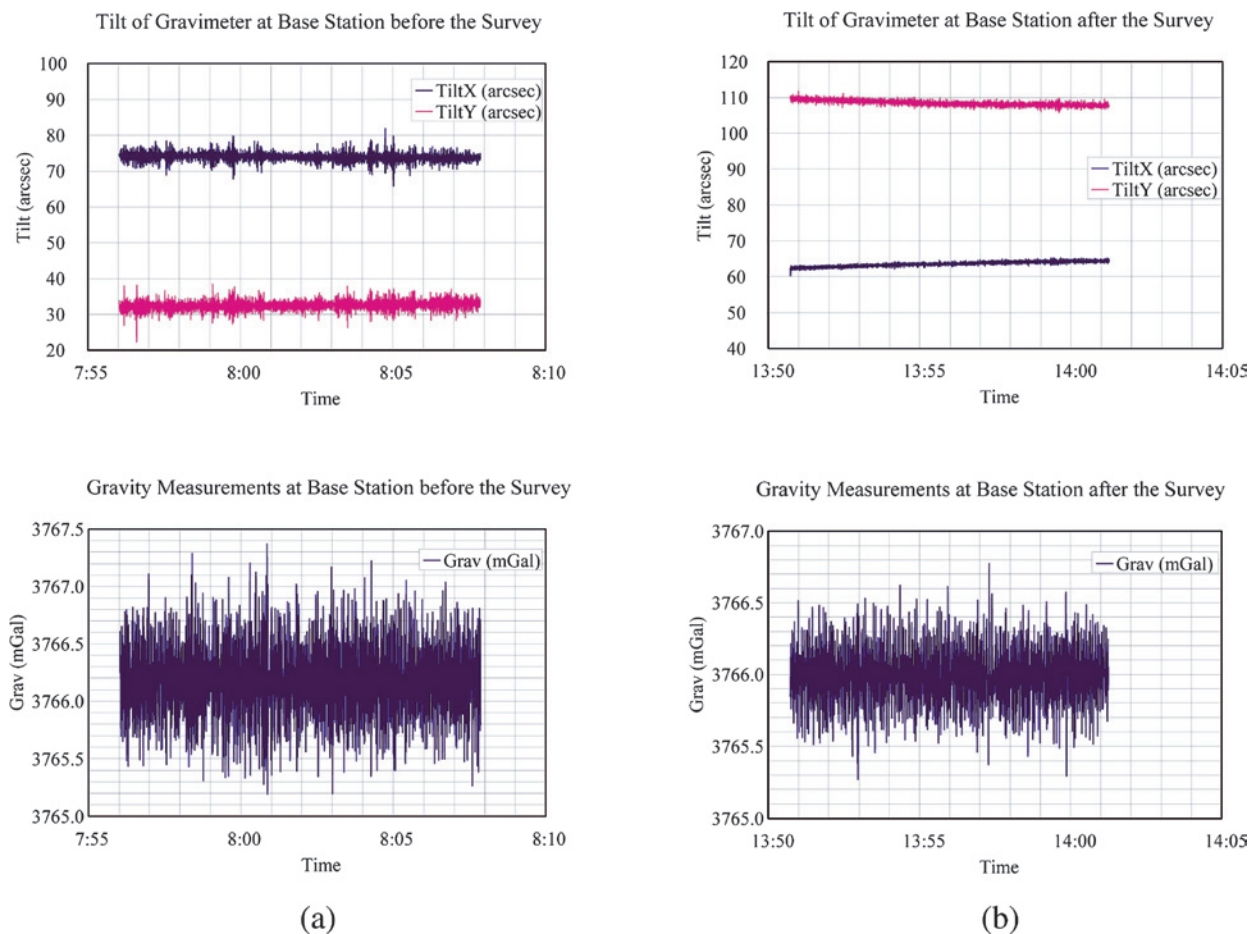
4. 測定結果

実海域試験後、データロガーのメモリーカードに記録された海底重力計による測定値を、RS-232C ケーブルを経由して、通信ソフトウェアを使用してパソコンに回収した。海底重力計による測定値に所定の変換を施して、相対重力値、重力計の傾斜値（2成分）および温度値を求めた。この結果を、棧橋基準点（第5図）と3箇所の測点（第6図）について示す。

第5図で明らかなように、陸上の基準点においては海底重力計の傾斜はほぼ一定であり、また安定して

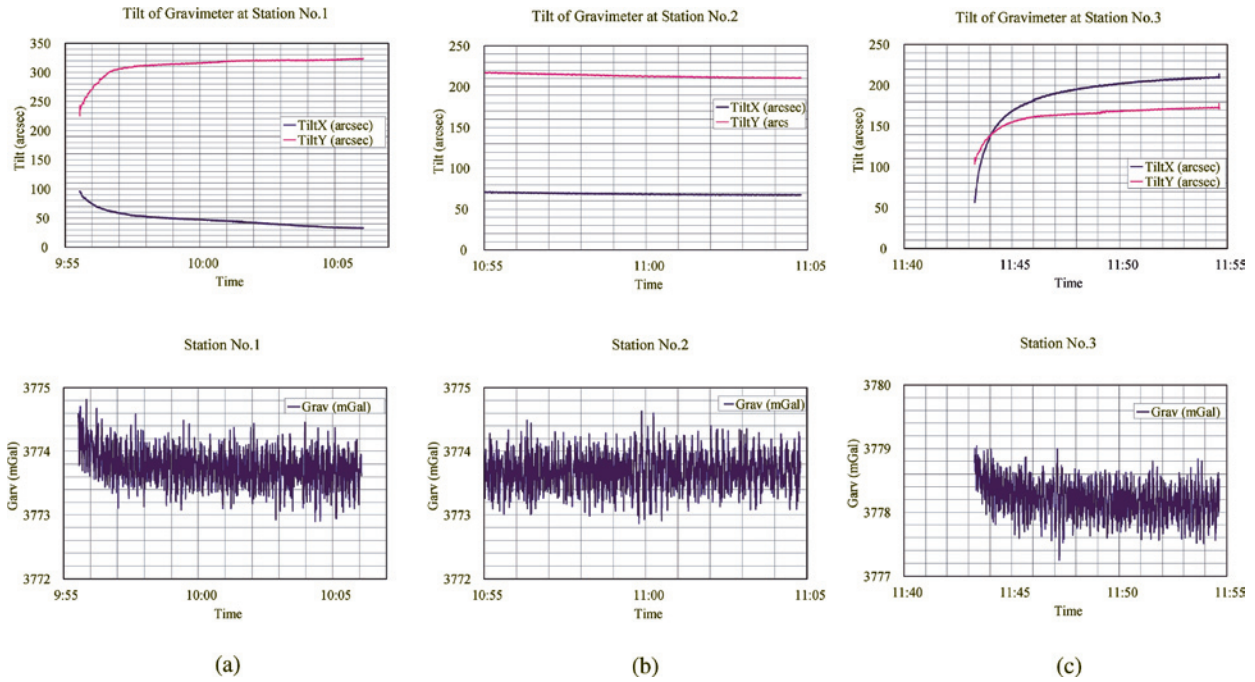
いる。出港前の傾斜の記録がより振動が大きいのは、帰港後に比べ風が強かったのと、自動車の通行などの生活雑音が多かったためと考えられる。傾斜測定値の標準偏差は、出港前が x 軸：1.18arcsec と y 軸：1.35arcsec で、帰港後が x 軸：0.68arcsec と y 軸：0.76arcsec である。この傾向は、重力値にも認められており、出港前の重力測定値の方が、振動の幅が大きい。重力測定値の標準偏差は、出港前が 0.305mGal で、帰港後が 0.188mGal である。これらの測定重力値は、重力センサーとして用いた CG-5 重力計の他のフィールドでの適用例（例えば杉原，2010）と比較しても、ほぼ同様の結果と判断される。

海底重力の観測点での測定データ（第6図）を参照すると、着底後、すぐに傾斜値が安定するもの（測点2）と、最初の2分程度大きく変化するもの（測点1および3）とに分けられる。これは、重力計を着底させた海底の底質状況を反映していると考えられる。



第5図 横須賀港新港埠頭三笠棧橋の重力基準点における重力測定結果。
(a) 出港前、(b) 帰港後；上段は重力計の傾斜、下段は測定相対重力値（ μGal ）。

Fig.5 Observed raw data of the gravity measurements by the ocean bottom gravimeter at the base station of the Mikasa Pier in the Yokosuka Port. Fig. (a) Before the survey, (b) After the survey. Upper panel: tilt variations of the gravimeter along x and y axes, Lower panel: observed relative gravity values.



第 6 図 三浦半島金田湾における海底重力の測定生データ。
(a), (b), (c) は各々測点 1, 2 および 3 での測定結果を示す。第 5 図参照。

Fig.6 Observed raw data of the ocean bottom gravity measurements in the Kaneda Bay of the Miura Peninsula.
(a), (b) and (c) indicate observed values at the Gravity Station 1, 2 and 3, respectively. Sea also Fig. 5

重力測定値にもこの影響は表れており、測点 1 および 3 においては、傾斜値が大きく変化する間、重力値も変化する。統計処理により重力値を求める際は、海底重力計が静置するまでの不安定な重力値を除外するのが望ましい。ただし、今回の場合、重力測定値に傾斜補正と温度補正を行ったところ、傾斜値が大きく変化する間を含めても重力値の変化は、高々小数点以下 2 桁以下と小さかったため、第 6 図に示した全測定値を母数としその平均値と標準偏差を求めた。この結果を、第 3 表に示す。

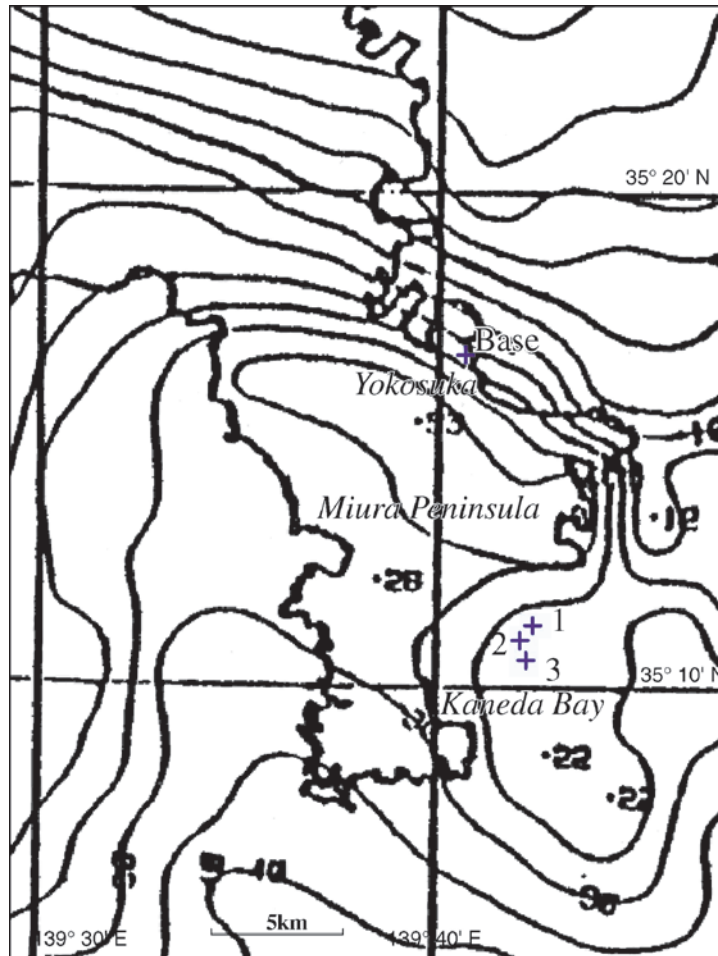
つぎに、地質調査所重力補正標準手順 (SPECG) (地質調査所重力探査グループ, 1989a) およびこれに基づく地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988 の処理プログラム (地質調査所重力探査グループ, 1989b) にしたがって、重力測定値の補正を行った。なお、この際、ラコスト陸上用重力計を用いた閉合測定により、既存の絶対重力値既知点から今回の陸上基準点での絶対重力値 (979765.730mGal) を決定し、これから各測点での絶対重力値を求めている。地質調査所重力補正標準手順では、まず前処理として、器差補正、機械高補正、潮汐補正およびドリフト補正を行う。次に、本処理として地形補正、フリーエア補正、大気補正、大地補正、ブーゲー補正および正規重力値 (測

地基準系 1985) の計算を実行する。これらの処理により、以下の式を用いてブーゲー異常を求める。

$$\text{ブーゲー異常} = \text{観測絶対重力値} - (\text{正規重力値} - (\text{フリーエア補正} + \text{大気補正})) + \text{地形補正} + (\text{ブーゲー補正} + \text{大地補正})$$

この結果を、第 4 表に示す。

重力補正の結果、仮定密度に対応したブーゲー異常が得られるが、ここでは仮定密度が 2.3g/cm^3 のブーゲー異常を示している。参考のため、当該地域の既存のブーゲー異常図上に今回の測定点位置をおとした図面を第 7 図に示す。既存のブーゲー異常図としては、海上重力測定結果に基づく重力図 (植田ほか, 1987) を使用した。今回の試験で基準点 (Base) でのブーゲー異常は 9.194mGal で、重力図上では 10mGal のコンター付近にある。海底測定点 1, 2 および 3 では、それぞれ 22.338mGal , 22.163mGal , 23.713mGal となる。一方、これらの海底測定点は重力図上では重力値が $20\sim 25\text{mGal}$ 付近に位置している。重力図の作成方法が異なり厳密な比較は出来ないが、今回製作した海底重力計による重力測定は概ね良好であったと考えられる。また、調査地域のより詳細な重力分布を観測していると考えても良い。



第 7 図 既存のブーゲー異常図と今回の重力測定点。
ブーゲー異常図は、植田ほか（1987）に加筆修正。仮定密度：2.3g/cm³。コンター間隔：5mGal。青の十字は、今回の重力測点（Base, 1, 2, 3）を示す。

Fig.7 Bouguer anomaly map with the locations of the observed gravity stations of the experiment.
The gravity map was modified from Ueda et al. (1987). Assumed density is 2.3 g/cm³. Contour interval is 5 mGal. Blue crosses (Base, 1, 2 and 3) indicate the locations of gravity stations of this experiment.

第 3 表 実海域試験における海底重力測定結果。

Table 3 Results of the ocean bottom gravity measurements.

Station Name	LAT. (deg)	LONG. (deg)	HEIGHT (m)	RAW-G (mGal)	TILT_X (arcsec)	TILT_Y (arcsec)	TEMP. (arcsec)	COR-G (mGal)	SD (mGal)	ABS-G (mGal)
Base	35.2842	139.6744	1.22	3766.186	73.883	32.490	-0.051	3766.254	0.305	979765.730
1	35.1914	139.7040	-19.59	3773.755	47.077	312.622	0.017	3774.913	0.243	979774.275
2	35.1862	139.6987	-19.97	3773.687	68.714	213.625	0.474	3774.331	0.256	979773.703
3	35.1794	139.7013	-41.65	3778.208	188.825	162.836	0.021	3778.937	0.231	979778.323

LAT.: 緯度, LONG.: 経度, HEIGHT: 測定標高, RAW-G (mGal): 傾斜および温度補正前の相対重力値, TILT_X, TILT_Y: 重力計の X, Y 方向の傾斜, TEMP.: 重力計の温度, COR-G: 傾斜および温度補正済みの相対重力値, SD: 標準偏差, ABS-G: 絶対重力値。

第4表 実海域試験における重力補正結果.

Table 4 Results of a gravity correction for the observed gravity values on the ocean bottom.

Station Name	LAT. (deg)	LONG. (deg)	HEIGHT (m)	TIDAL HEIGHT (m)	ABS-G (mGal)	NOR-G (mGal)	FAC (mGal)	BGC (mGal)	TC (mGal)	F-A (mGal)	B-A (mGal)
Base	35.2842	139.6744	1.22	0.02	979765.730	979757.918	1.246	-0.118	0.253	9.058	9.194
1	35.1914	139.7040	-19.59	0.28	979774.275	979750.017	-5.176	1.898	1.359	19.082	22.338
2	35.1862	139.6987	-19.97	0.15	979773.703	979749.576	-5.294	1.935	1.394	18.833	22.163
3	35.1794	139.7013	-41.65	0.01	979778.323	979748.996	-11.985	4.034	2.337	17.342	23.713

LAT.: 緯度, LONG.: 経度, HEIGHT: 測定標高, TIDAL HEIGHT: 潮位, ABS-G: 絶対重力値, NOR-G: 正規重力, FAC: フリーエア補正+大気補正, BGC: プーゲー補正+大地補正, TC: 地形補正, F-A: フリーエア異常, B-A: プーゲー異常.

5. まとめ

今回、沿岸域での重力測定に資するため海底重力計を製作し、その実海域試験を行った。その結果、当該の重力計は、海底重力測定において正常に取り扱え、その測定値も既存の重力図と比較して妥当であると判断された。今後は、重力の検定路線での測定を行い、機器定数等を確認して次回の海底重力調査に備える予定である。

謝辞

海底重力計の実海域試験にあたり、海上保安庁横須賀海上保安部および横須賀市東部漁業共同組合に便宜を図っていただいた。以上の機関に謝意を表します。

文献

- 地質調査所重力探査グループ (1989a) 地質調査所重力補正標準手順 SPEC 1988 について. 地調月報, 40, 11, 601-611.
- 地質調査所重力探査グループ (1989b) 地質調査所重力補正標準手順 SPEC 1988 の処理プログラム. 地質調査所研究資料集, No.137.
- 駒澤正夫・大熊茂雄・金澤敏彦・藤本博己 (2009) 能登半島北部沖における海底重力調査. 平成20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, 49, 71-80.
- 杉原光彦 (2010) シントレックス重力計 CG5 の特性評価, 広河原 CO₂ 間欠泉での調査. 日本地熱学会誌, 32, 1, 21-30.
- 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, 22, 179-206.