

能登半島北部沖における海底重力調査

Sea floor gravity survey of offshore area of Northern Noto Peninsula

駒澤正夫¹・大熊茂雄¹・金澤敏彦²・藤本博己³

Masao Komazawa¹, Shigeo Okuma¹, Toshihiko Kanazawa², Hiromi Fujimoto³

Abstract : A sea floor gravity survey was carried out from September to October in 2008 along the northern offshore of Noto peninsula in order to understand a shallow and whole underground structure. The measurement points were arranged within 5km offshore at every 2km interval and the number of measurement points became 86 points. The characteristic Bouguer anomalies are that the gravity low anomalies extended from ENE to WSW are located in the several km offshore through the steep gradients structure which locates around the seashore, and that the Bouguer anomalies increase in the side of land. The low Bouguer anomalies are found out in Wajima bay, it also show that the graben structure exists there.

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

要旨

能登半島北部沖で浅部地下構造を広域的に把握するため 2008 年 9 月より 1 ヶ月かけて海底重力調査を行った。測定点はほぼ 2km 間隔に沖合 5km 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、船上重力でも見られた勾配構造が、より急勾配構造であることが判ったことである。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

本調査は、2007 年 3 月に発生した 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、能登半島北部の海陸接合域の重力構造把握するために実施された海底重力調査である。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 5km 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 調査地域

海底重力の調査範囲は、能登半島沖の海岸線に沿った約 60km × 沖合約 5km（約 300 km²）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 1km 程度移した。

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 東京大学地震研究所 (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

³ 東北大学 (Tohoku University)

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 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。海域の測定点数は 86 点となった。

3 海底地形

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 4km 程度で 100m を超すが、あとは、沖合 5km でも 100m 未満で海底重力計の測定能力内に収まっている。調査域東部の飯田湾は沖合 6km でも水深は 50m 程度で測定は容易なところと考えられる。珠洲岬（緑剛岬）から北東方向には水深 50m 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測点計画から除外した。

なお、重力の測定は、当初、水深 50m 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 ~ 86.7m であった。

4 調査の方法

海域での重力測定は、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（第 2 図及び写真 1）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徴がある。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 0.01mGal 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常数のチェックを実施した。

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 ケ所を用いた。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 1996 に準拠）は Scintrex 社製の CG-3M/SB 陸上重力計を 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。位置精度は約 0.002'（実長約 4m）以内である。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 0.05m 以内の精度で決定した。

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 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沿岸域数値化原図水深値（J-BIRD フォーマット）と JEGG500（メッシュデータ）から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。なお、本調査域の海底地形は起伏に富み、地形補正の精度を確保するため DEM（200m メッシュ）を再作成した。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 ρ 、水の密度が ρ_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でなっている。

第3図に船上重力(a)と海底重力(b)による編集図の比較を示す。船上重力データは測定値自体がフィルター処理されており厳密にはその場所の重力値を反映しないため海底重力データとは一致しないため海底重力測定がなされた周辺域の船上重力データを除外して編集したものが(b)である。(a)と(b)を比較すると海底重力による結果は、微細構造を抽出しているのが明瞭であることが判る。特に、沖合数kmの低重力帯は船上重力では滑らかなパターンを示しているところが、海底重力ではシャープな勾配に画され微細な構造も見えている。

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 2.4g/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作成した(第4図)。また、本調査の結果を Table.1 に示す。

6.1 主な特徴

概略の特徴を以下にのべる。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 2.4g/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 3km 程のところで東北東から西南西に伸びた 30mgal 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 100m を超す最深部が七ツ島の南方約 6km のところに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。

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す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。

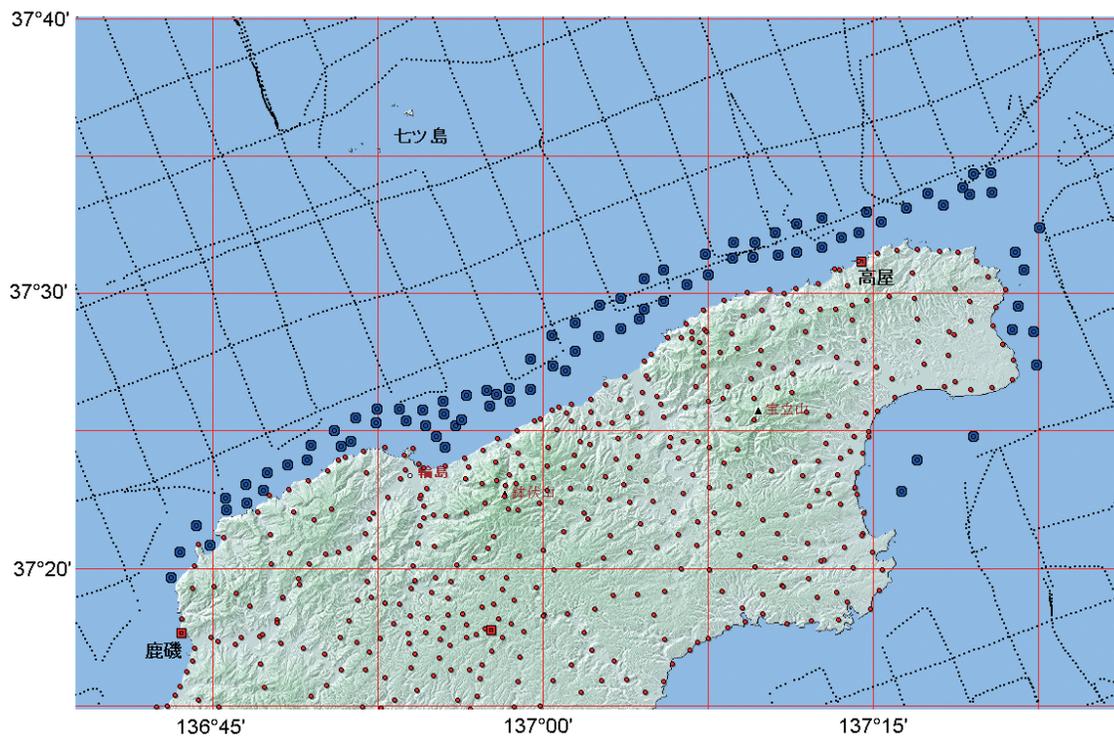
ブーゲー異常から、能登半島北部の沖合数kmのところから従来の船上重力調査からは不鮮明であった急勾配の断層状構造が明瞭に抽出され、更にその北側には東北東-西南西方向の帯状の低重力異常が存在することが判った。輪島湾にも低重力異常が見出され陥没状の構造を持つことも判った。

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、上記の方々には謝意を表します。

文献

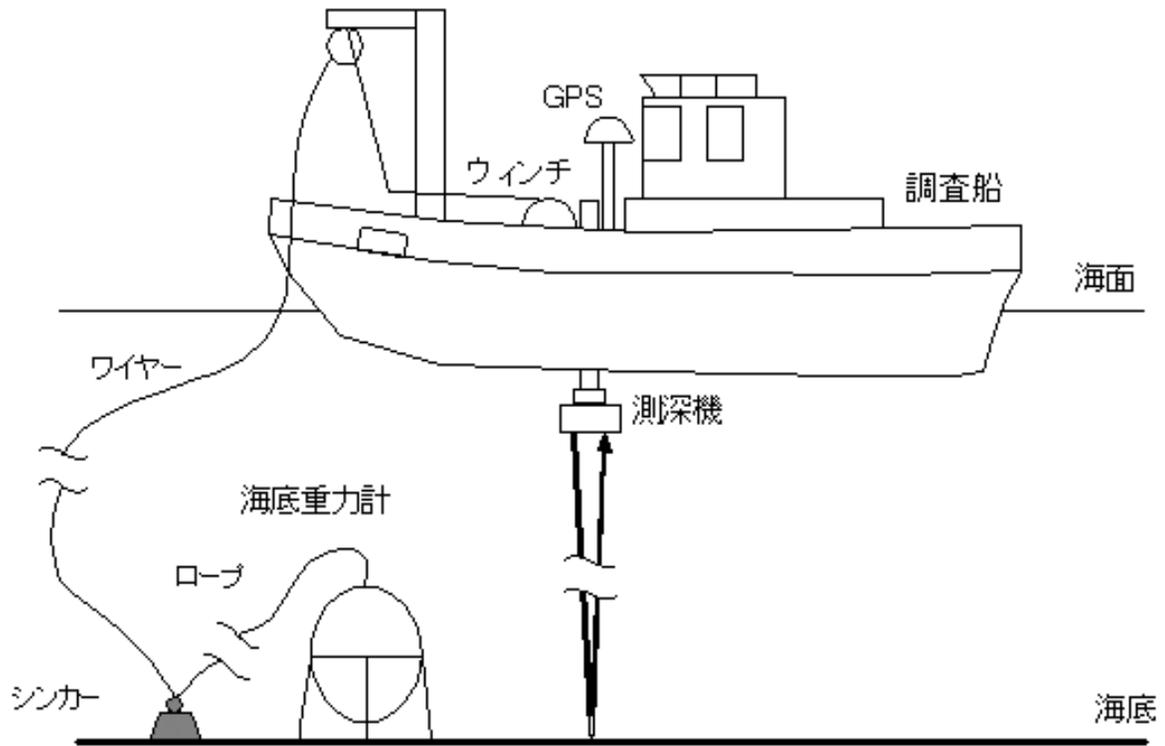
藤本博巳・押田淳・古田俊夫・金沢敏彦（1998）：海底重力計の開発，海洋調査技術，10, 1,25-38.
上嶋正人・石原丈実・小泉金一郎・島伸和・押田淳・藤本博巳・金沢敏彦（2006）：瀬戸内海播磨灘での海底重力測定，海洋調査技術，18, 1,17-27.

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.



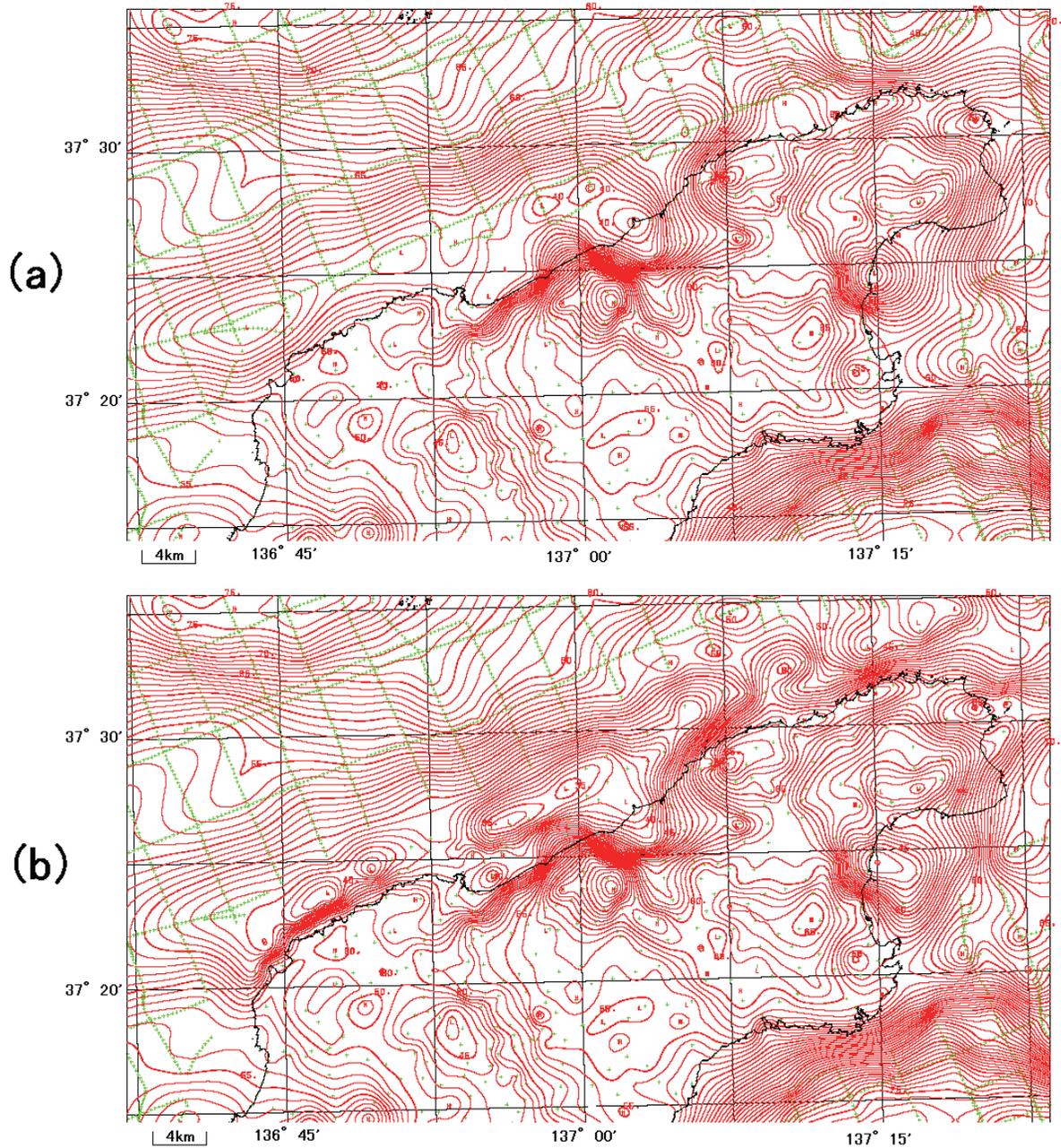
第 1 図 測定点分布図. 青丸：海底重力測点，赤小丸：陸上重力測点，黒ドット：船上重力測点.

Fig.1 Distribution of gravity stations. Cross marks denote the sea. Blue circles: floor observation points, Red small circles: land gravity survey, Black dots: ship-borne gravity.



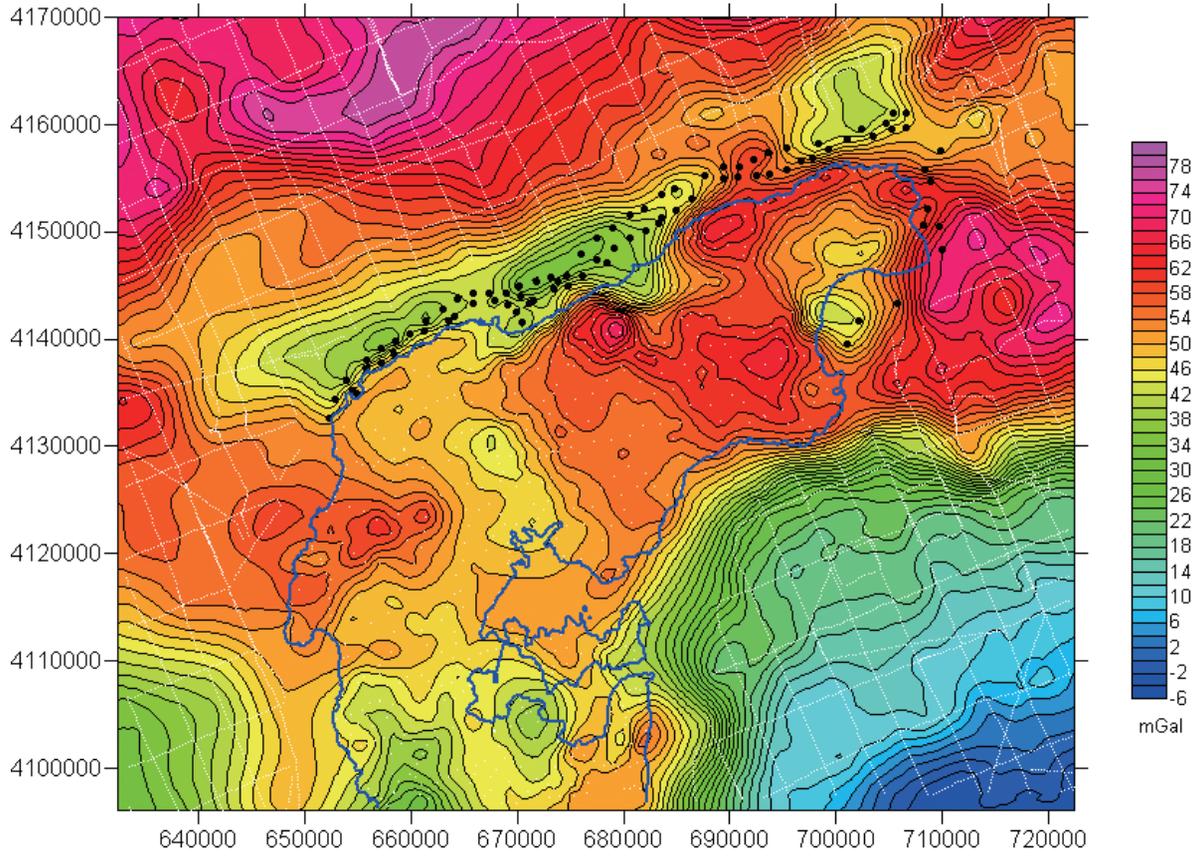
第2図 海底重力調査の模式図.

Fig.2 Conceptual figure of measurement of sea floor gravity.



第3図 船上重力と海底重力の比較. (a) : 船上重力データ. (b) : 海底重力データ.

Fig.3 Comparison of ship-borne gravity and sea floor gravity. (a): ship-borne gravity survey. (b): sea floor gravity survey



第4図 能登半島北部のブーゲー異常. 仮定密度は 2.4g/cm^3 , コンター間隔は 1mgal .

Fig.4 Bouguer anomalie in and around northern Noto Noto peninsula. Assumed density is 2.4g/cm^3 , and contoured at 1mGal interval.

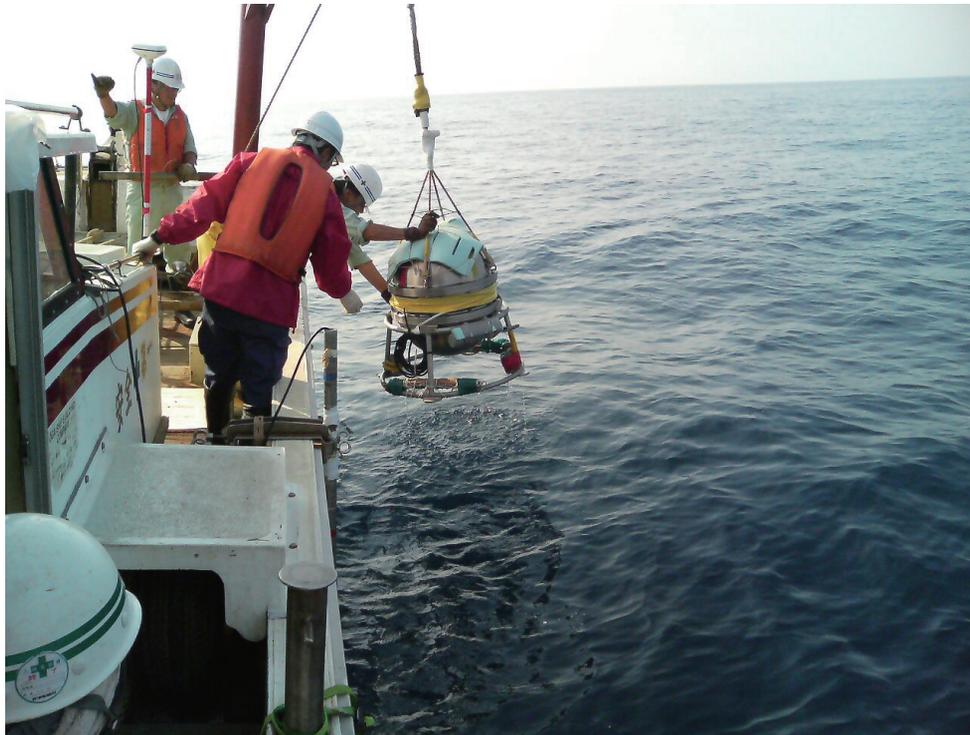


写真1 海底重力調査.

Photo.1 Measurement of sea floor gravity.

表 1 -1 成果表.

Table.1-1 Result of sea floor gravity survey.

NO.	LAT.	LONG.	HEIGHT	ABS-G	NOR-G	TC	F-A	B-A
							(DENSITY = 2.40)	
1	3719.69	13643.11	-61.76 HP	979990.64	979934.20	3.72	38.25	48.22
2	3720.62	13643.50	-58.45 HP	979986.96	979935.56	3.01	34.24	43.16
3	3721.58	13644.25	-51.14 HP	979983.60	979936.95	2.63	31.75	39.55
4	3720.87	13644.90	-11.71 HP	979985.89	979935.92	1.17	47.23	49.59
5	3722.58	13645.60	-71.45 HP	979987.67	979938.40	3.62	28.09	38.94
6	3722.15	13645.64	-40.97 HP	979989.74	979937.78	2.70	40.19	47.04
7	3723.11	13646.52	-68.79 HP	979986.35	979939.17	3.44	26.83	37.23
8	3722.42	13646.56	-31.58 HP	979989.56	979938.16	2.30	42.52	48.02
9	3722.86	13647.32	-40.12 HP	979990.55	979938.81	2.56	40.23	46.85
10	3723.50	13647.47	-66.57 HP	979985.68	979939.74	3.37	26.27	36.37
11	3723.81	13648.38	-64.10 HP	979991.27	979940.20	3.35	32.17	42.01
12	3724.50	13649.45	-68.90 HP	979987.92	979941.20	3.42	26.33	36.73
13	3723.99	13649.30	-42.03 HP	979988.97	979940.45	2.49	36.43	43.16
14	3725.04	13650.53	-58.15 HP	979989.99	979941.98	2.85	30.95	39.67
15	3724.49	13650.85	-31.66 HP	979987.61	979941.18	1.95	37.53	42.69
16	3724.65	13651.29	-23.34 HP	979986.06	979941.41	1.45	38.31	42.13
17	3725.51	13651.49	-53.20 HP	979991.74	979942.67	2.55	33.53	41.46
18	3725.84	13652.48	-54.60 HP	979994.35	979943.15	2.58	35.23	43.33
19	3725.35	13652.43	-24.68 HP	979987.35	979942.43	1.35	38.17	42.02
20	3725.41	13653.80	-40.47 HP	979988.81	979942.52	2.02	34.67	40.79
21	3725.83	13653.49	-47.80 HP	979992.97	979943.13	2.30	35.97	43.11
22	3725.79	13654.54	-50.50 HP	979989.85	979943.07	2.45	32.07	39.63
23	3725.24	13654.68	-38.68 HP	979990.96	979942.27	2.00	37.63	43.54
24	3724.83	13655.17	-30.40 HP	979988.20	979941.68	1.75	38.01	42.84
25	3726.12	13655.46	-61.28 HP	979986.62	979943.56	2.93	25.03	34.16
26	3725.65	13655.51	-49.24 HP	979986.98	979942.86	2.47	29.80	37.25
27	3724.33	13655.57	-18.44 HP	979981.49	979940.95	1.48	35.72	39.06
28	3726.32	13656.52	-64.56 HP	979986.88	979943.84	3.11	23.99	33.64
29	3725.43	13656.32	-44.31 HP	979989.32	979942.55	2.39	33.97	40.84
30	3725.23	13656.05	-38.00 HP	979989.91	979942.26	2.13	36.80	42.77

能登半島北部沖における海底重力調査

表 1-2 成果表.

Table.1-2 Result of sea floor gravity survey .

NO.	LAT.	LONG.	HEIGHT	ABS-G	NOR-G	TC	F-A	B-A
							(DENSITY = 2.40)	
31	3726.36	13657.89	-60.48 HP	979989.40	979943.90	3.05	27.71	36.88
32	3726.52	13657.46	-67.43 HP	979988.51	979944.14	3.27	24.43	34.53
33	3725.96	13657.57	-52.51 HP	979991.10	979943.32	2.77	32.46	40.54
34	3726.58	13658.48	-63.15 HP	979990.06	979944.22	3.16	27.23	36.77
35	3726.13	13658.51	-42.54 HP	979993.26	979943.56	2.40	37.44	44.15
36	3727.67	13659.43	-76.83 HP	979991.47	979945.81	3.58	22.83	34.18
37	3726.56	13659.44	-41.40 HP	979989.86	979944.20	2.28	33.76	40.23
38	3727.41	13700.43	-46.47 HP	979988.43	979945.42	2.37	29.54	36.61
39	3728.52	13700.42	-79.28 HP	979994.61	979947.04	3.64	23.99	35.65
40	3727.94	13701.48	-53.27 HP	979990.96	979946.20	2.60	29.19	37.18
41	3729.00	13701.46	-74.08 HP	979996.07	979947.73	3.41	26.35	37.26
42	3727.24	13701.01	-42.46 HP	979988.61	979945.18	2.19	31.20	37.69
43	3728.48	13702.52	-60.48 HP	979994.10	979946.98	2.91	29.33	38.36
44	3729.65	13702.55	-72.97 HP	980003.82	979948.69	3.36	33.49	44.23
45	3729.86	13703.52	-66.28 HP	980003.43	979949.00	3.10	34.85	44.66
46	3728.78	13703.53	-60.19 HP	979995.95	979947.43	2.96	30.83	39.87
47	3729.11	13704.38	-62.15 HP	979998.18	979947.90	3.12	31.97	41.39
48	3730.58	13704.58	-75.29 HP	980007.42	979950.04	3.49	35.03	46.14
49	3729.47	13704.61	-67.95 HP	980001.27	979948.42	3.35	32.75	42.97
50	3730.92	13705.49	-78.70 HP	980005.59	979950.53	3.66	31.65	43.27
51	3729.78	13705.49	-64.30 HP	980003.22	979948.88	3.26	35.38	45.14
52	3730.37	13706.53	-57.72 HP	980003.41	979949.73	2.94	36.74	45.52
53	3728.67	13722.27	-26.75 HP	980016.77	979947.26	1.13	62.14	65.97
54	3731.50	13707.39	-84.82 HP	980012.26	979951.38	3.96	35.59	48.13
55	3731.91	13708.63	-86.65 HP	980018.55	979951.97	4.04	40.71	53.53
56	3731.35	13708.59	-76.27 HP	980013.61	979951.16	3.70	39.79	51.21
57	3731.93	13709.64	-81.23 HP	980022.94	979952.00	3.83	46.74	58.79
58	3731.39	13709.55	-69.94 HP	980020.27	979951.22	3.44	48.34	58.86
59	3731.44	13710.67	-57.92 HP	980015.91	979951.28	2.91	47.62	56.40
60	3732.28	13710.56	-81.38 HP	980025.25	979952.51	3.82	48.50	60.55

表 1-3 成果表.

Table.1-3 Result of sea floor gravity survey .

NO.	LAT.	LONG.	HEIGHT	ABS-G	NOR-G	TC	F-A	B-A
							(DENSITY = 2.40)	
61	3732.58	13711.51	-82.63 HP	980023.12	979952.96	3.88	45.55	57.79
62	3731.54	13711.52	-59.64 HP	980013.80	979951.44	3.02	44.84	53.88
63	3732.80	13712.69	-83.97 HP	980014.92	979953.28	3.96	36.60	49.06
64	3731.73	13712.68	-56.16 HP	980012.52	979951.71	2.91	44.35	52.94
65	3732.10	13713.54	-65.18 HP	980013.02	979952.26	3.31	41.52	51.42
66	3732.28	13714.36	-53.48 HP	980008.15	979952.51	2.78	40.01	48.20
67	3733.01	13714.68	-81.44 HP	980008.35	979953.57	3.92	30.52	42.68
68	3732.66	13715.34	-53.36 HP	980006.99	979953.07	2.77	38.32	46.49
69	3724.00	13717.00	-36.92 HP	979989.16	979940.47	2.16	38.17	44.07
70	3733.16	13716.52	-57.34 HP	980006.74	979953.79	2.91	36.13	44.84
71	3722.83	13716.26	-37.22 HP	979990.41	979938.76	2.23	41.03	47.03
72	3733.69	13717.47	-61.92 HP	980003.85	979954.57	3.10	31.04	40.41
73	3733.28	13718.19	-49.68 HP	980006.70	979953.98	2.63	38.26	45.92
74	3724.83	13719.55	-62.39 HP	980005.46	979941.67	3.25	45.41	54.98
75	3733.91	13719.08	-58.71 HP	980007.33	979954.88	3.03	35.20	44.17
76	3733.65	13719.39	-54.19 HP	980008.83	979954.51	2.86	38.48	46.82
77	3734.39	13719.55	-64.19 HP	980006.45	979955.59	3.28	31.92	41.69
78	3733.72	13720.37	-43.57 HP	980008.52	979954.61	1.80	41.35	47.56
79	3734.44	13720.35	-56.12 HP	980010.13	979955.65	2.29	38.03	45.99
80	3728.74	13721.33	-11.59 HP	980008.48	979947.37	0.50	58.41	60.08
81	3732.45	13722.53	-51.51 HP	980009.49	979952.76	2.11	41.70	49.02
82	3731.56	13721.47	-26.48 HP	980009.25	979951.46	1.11	50.49	54.28
83	3729.59	13721.56	-18.54 HP	980009.80	979948.59	0.79	56.36	59.03
84	3730.91	13721.82	-24.94 HP	980016.58	979950.52	1.05	59.23	62.81
85	3727.45	13722.41	-20.50 HP	980017.91	979945.49	0.87	66.97	69.91
86	3721.05	13644.65	-20.98 HP	979986.69	979936.18	1.44	44.90	48.47