

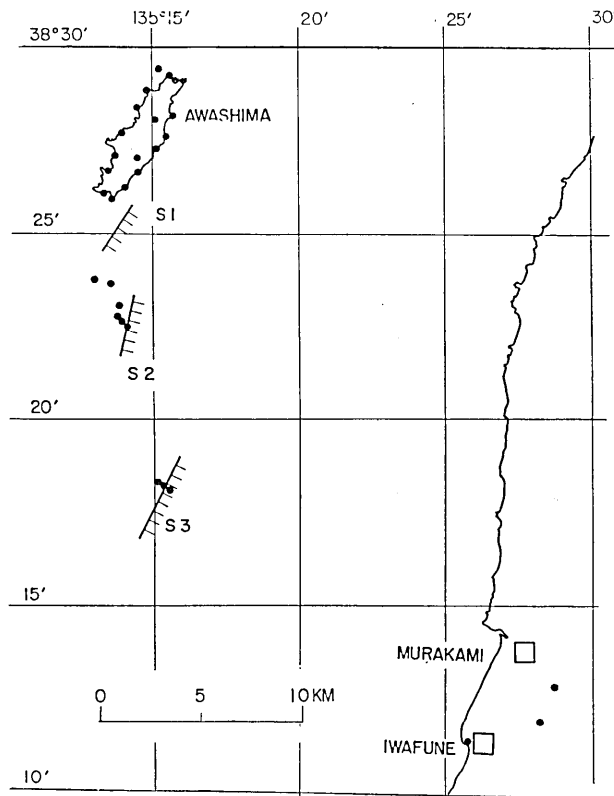
15. 粟島およびその周辺海底における重力測定

地震研究所 { 笠原慶一
萩原幸男
田島広一
川田薫

(昭和39年11月24日および昭和40年4月27日発表—昭和40年12月27日受理)

はしがき

1964年6月の新潟地震に際して、震央にほど遠くない粟島に隆起変動が現われた。隆起量0.8~1.5mにおよぶその様相や震源域・津波浪源に関する情報から推定すれば、今回の変動が単に粟島局地に限らずその周辺の海底にも広範囲におよぶものであろうことは



第1図 重力点の分布

想像に難くなかつた。やがて行なわれた水路部の調査は同島周辺海底一帯の隆起に加えて数条の断層崖状地形の出現した事実を明らかにしたのである。

従来、地変の研究といえば、直接的調査の手は海底部分にまでは及ばないのが常である。今回は上記諸発見が刺激となり、最新の海洋調査手段を動員して海底地変調査に新段階を開拓しようとする気運が動きつつあつた。たまたま深海作業船「よみうり」号の調査協力

第1表 重力測定結果

No.	地点名	緯度	経度	高度	g	γ_0	$\delta g_0 - \delta g_0''$	$\delta g_0'$	$\Delta g_0''$
				m	980. gal	980. gal	mgal	mgal	mgal
0	内浦観音堂	38° N 27.6	139° E 15.4	4.83	10277	04442	0.95	0.90	+60.2
1	小柴山 T.P.	27.1	14.5	266.5	04686	04369	52.42	7.53	+63.1
2	ウナ町海岸	27.1	13.7	0.71	11482	04369	0.14	1.89	73.2
3	釜谷	26.7	13.5	0.85	11336	04310	0.17	1.70	72.1
4	カムラ	26.1	13.4	0.48	11206	04222	0.09	2.59	72.5
5	大阪山 T.P.	28.1	15.1	236.2	05552	04515	46.46	6.32	63.2
6	旗崎	28.2	15.7	1.87	10300	04530	0.37	0.57	58.6
7	鳥崎	29.1	16.1	1.73	10847	04661	0.34	0.23	62.4
8	遠貝栗	29.4	15.2	1.41	11718	04705	0.28	0.22	70.6
9	平山	28.9	14.8	1.01	11637	04632	0.20	0.63	70.9
10	仏崎	28.4	14.5	1.10	11683	04559	0.22	1.22	72.7
11	立島	27.7	14.9	1.90	11617	04457	0.37	0.99	73.0
12	テロ	26.6	14.5	0.21	10287	04296	0.04	4.23	64.2
13	矢ヶ鼻	25.9	14.6	0.64	11129	04193	0.13	0.65	70.1
14	テロ	26.2	14.1	0.53	10499	04237	0.10	4.22	66.9
15	犬コロバン	29.1	15.9	1.01	11330	04661	0.20	0.68	67.6
16	"	29.3	15.6	1.52	11560	04691	0.30	0.33	69.3
	村上BM6490	12.9	29.1	16.61	05091	02292	3.27		31.3
	" BM6489	12.0	28.6	4.19	04906	02160	0.82		28.3
	岩船漁協組前	11.4	26.1	5.	04629	02073	0.98		26.5
1°	内浦海岸	27.6	15.5	0.61	09973	04442	0.12	0.90	56.3
3°	ハゲノ浜	27.3	15.2	0.79	10323	04398	0.16	1.70	61.1
S 1	海底	18.0	15.3	-87.	09318	03038	-17.11		45.7
S 2	"	18.0	15.5	-86.5	09325	03038	-17.01		45.9
S 3	"	18.0	15.7	-86.5	08671	03038	-17.01		39.3
①	"	22.7	13.9	-85.	09134	03725	-16.72		37.4
②	"	22.6	14.0	-86.	09203	03710	-16.92		38.0
③	"	22.4	14.2	-88.	09298	03681	-17.31		38.9
④	"	23.0	13.9	-86.	09742	03769	-16.92		42.8
⑤	"	23.6	13.6	-87.	10533	03857	-17.11		49.7
⑥	"	23.7	13.1	-87.	113	03871	-17.11		57.

が所有者側から示唆されたのを一契機として、この気運は急速に高まり、海底変動の総合調査を目的とする計画が関係諸機関の間でまとめられるに至った。

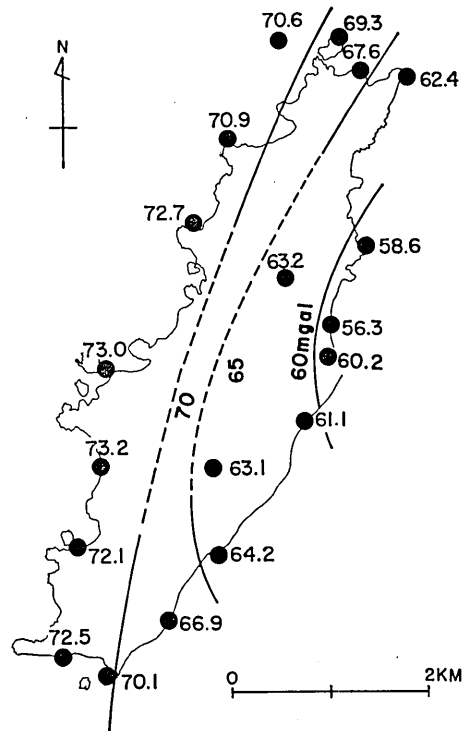
筆者等は同計画の一部として重力測定を実施する機会を得たのであるが、その目的は重力異常の調査を通じて断層地域の深部構造を明らかにすることであつた。各種の制約下に行なわれた事情から、その結果には不満足な点が少くない。しかしながらここに得られた資料は今回の地変、ひいては大地震現象の一面を考察する上に利用し得ようし、潜水測定作業の諸経験も今後この種の調査を計画する上に何らかの参考になるかと思われる。以下にその概略を報告する次第である。

測定作業

島内における測定

海底における重力測定に着手するに先立ち、島内および対岸本土において重力測定を行なつた(第1図)。これは粟島内陸の重力異常を明らかにすると共に、内浦港に設定した海底作業用仮基準点の重力値を決定するのが目的である。

このため東京大学構内の重力基準点($g = 979.80250 \text{ gal}$)を直接内浦の仮基準点に結ぶ作業によつて同点の値を決定した。今回の調査はすべて La Coste & Romberg の G 型重力計によつて行われた。この計器は、ドリフトが小さいので、われわれの作業には極めて好適であつた。参考のため内浦の仮基準点と対岸の本土側の村上の水準点 No. 6490, No. 6489 を結ぶ作業も行なつた。その結果を国土地理院による 1954 年当時の値¹⁾と比較すると、それぞれ 0.47 mgal , 0.30 mgal だけ今回の値が大きくなつている。新潟地震後、村上北方の地域に対する重力再測が同機関によつて行なわれた²⁾が、その結果に比べると今回の測定は、それぞれ $+0.14 \text{ mgal}$, $+0.11 \text{ mgal}$ 増となつている。国土地理院の再測では現地では仮の不変の点を設けて測定したものであり、われわれは東京から直接結ん



第2図 粟島島内における重力異常($\Delta g_0''$)の分布 (単位 mgal)

- 1) G. S. I., "Gravity Survey in Japan (2)" II. Gravity Survey in the Tōhoku District., *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 5 (1957), 72.
- 2) 国土地理院測地部測地第一課「新潟地震調査重力測量中間報告」昭和 39 年 6 月新潟地震地盤変動調査報告 建設省国土地理院 (1965).

でいるにもかかわらずこの程度の差におさまったことから見て、今回の測定は満足すべきものであつたといえよう。

異常値を求める補正手続きについては、高度補正量に 0.3086 mgal/m 、平均密度として 2.67 gr/cm^3 、標準重力には国際式を各々採用した。海岸の重力点に対しては簡単な水準測量によつて海拔を求め、三角点に対しては島全体が地震時に約 1 m 隆起していることを考慮し、海岸隆起量を内挿した値を地形図記載の高度に加えてその高度とした。地形補正はかつて筆者の一人が作成したプログラム³⁾により 20 km までの範囲に対して行なつた。

第1表はこれらの諸量を示すもので、その結果にもとづいて島内における重力異常の分布を記入したものが第2図である。

海底における重力測定

本作業は前述の重力計を深海作業船「よみうり」号の前部トリムタンク上に搭載し、8月26日にS3近傍で、また9月1日にS2～S1海域で行なわれた。ここにS1, S2, S3等は第1図中の位置に発見された断層崖状地形の仮名称である。これら海底区域はいずれも水深 $80 \sim 90 \text{ m}$ で砂泥質の比較的平坦な地形であつた。筆者等の採用した方式は、いわば変則的で、陸上用重力計を潜水船内に持ちこみ、必要地点に着底して測定するものであるが、他種の調査と平行して行なえる利点が買われた。

第一に問題になるのは船体の動揺であるが、上記2回の潜水を通じて測定不能になるような障害を受けなかつたのは幸いであつた。特に第2回の潜水の場合は絶好の条件に恵まれ、陸上とほとんど変わらない容易さで測定を進めることができた。このような好条件下では測定能率はむしろ潜水船の移動機能(船位測定の問題を含めて)にかかつてくるようである。

海底測点の位置算出は2段階に分けて行つた。すなわち、調査予定海域に敷設した浮標の位置を水路部調査帯によりデッキ測位機で測定してもらい、潜水船着底位置はこれら浮標から算出した。第1図に示す測点位置はこのようにして求めたものである。着底深度は重力補正に不可欠なものであり、高度(深度)補正を 1 mgal の精度で行なうにはメートルの端数まで深度を測定する必要がある。潜水船常備の深度計はこの目的に適當でないので、高精度測深機(海上電機SD 1500型)で測定予定線に沿う海底地形断面を作成し、それにもとづいて測点深度を求める方法をとつた。対象海底が平坦なため、この方法によつても 0.5 m 程度の精度は確保し得たものと思われる。

測定結果は第1表下部に示す通りである。地形補正は陸上測点に対するよりむしろ簡単に処理することができた。

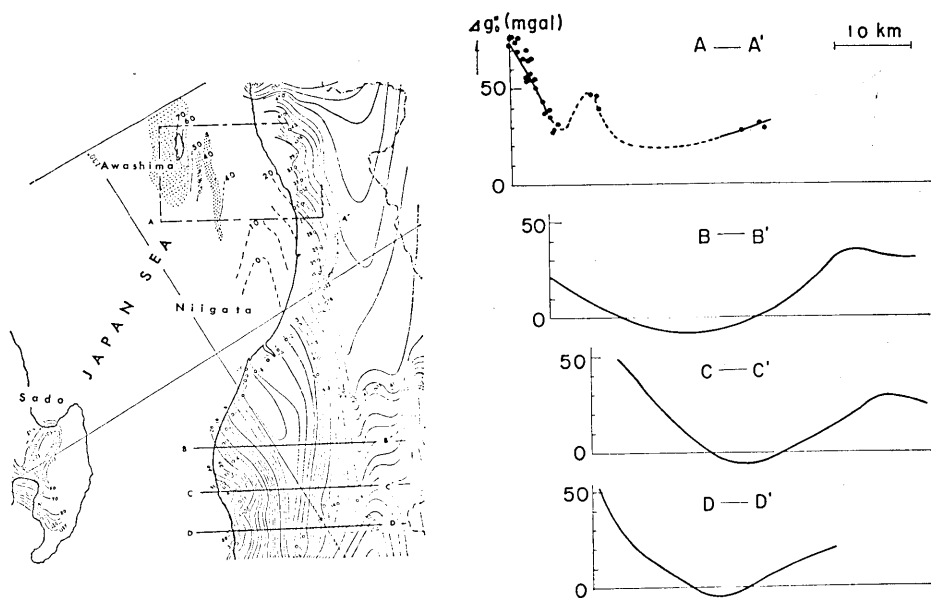
測定結果に対する考察

重力異常の分布

今回の調査を通じて測定が行なわれた地点は陸上・海底をあわせて30を超える。第1

3) RIKITAKE et al., "Gravimetric and Geomagnetic Studies of Onikobe Area," *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 43 (1965), 241.

表の数値にもとづいて重力異常の分布を画いてみると第3図(鎖線内)のようになる。測点が偏在しているため粟島海峡中央部以東の分布は確かではないけれども、同図に記載してある通り既存の資料を参照すると、新潟平野から北東に伸びる重力の低異常がその勢いを弱めつつ同海峡に達している様子がかがわれる。第3図中の B-B', C-C', D-D' に沿う重力異常分布から推定すれば、粟島海峡の重力異常は本土沿岸部のそれより 10~20 mgal 程度低いものと仮定しても大きな誤りはないであろう。同図右上に示す曲線はこの推定にもとづいて、N 60°W, すなわち粟島の長軸にほぼ直交する線(A-A')上に投影した重力異常の分布を示すものである。粟島における隆起傾動や地質・地形学的特徴が共に島の長軸に平行する傾向にあることはすでに指適されているが⁵⁾、重力異常から推測される地下構造もその例にもれないわけである。したがって、粟島地域の地下構造を考察するのに2次元模型の立場をとることも、第1近似の段階としては許されるであろう。今回の



第 3 図

左図: 新潟地方における Bouguer 異常の分布 (陸地部は坪井・実川・田島⁴⁾の原図による; 鎖線内は今回の測定結果 (いずれも mgal 単位). 粟島周辺の打点はスパーカー調査による d 層露出地域。
右図: 各測線に沿う Bouguer 異常値の分布断面。

- 4) C. TSUBOI, et al., "Gravity Survey along the Lines of Precise Levels throughout Japan by means of a WORDEN Gravimeter, Part VI, Chūbu District," *Bull. Earthq. Res. Inst., Suppl.*, 4 (1955), Part 5, 268-275.
- 5) 中村一明・笠原慶一・松田時彦「新潟地震による粟島の地変」地震研究所研究速報 8 (1964), 73-90.

測定資料だけで地下構造を確定するのは困難であるが、既存の他資料を参照しつつ「考え得る地下構造模型」の 1, 2 を考察してみよう。

地下構造の模型

粟島、あるいは広く新潟地方の地下構造に関する諸情報の整理は、次段階への準備として不可欠なことと思われる。

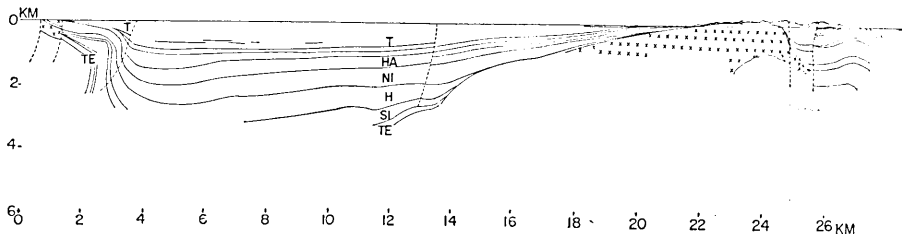
まず、新潟地方一帯にわたる重力測定の資料を情報の一つとして挙げなければならない。第 3 図にも見られる通り大きな向斜構造を暗示する分布が北東に伸び粟島海峽中央部に届いている点が特に注目される。また同地方は地下資源開発の立場から重要視されているため、各種の地下探査が行なわれてきた。第 4 図は石油資源開発会社において作成された弥彦・角田一新津の線に沿う地下構造概念図であつて、坑井探査を含む各種探査の結果を総合的に整理したものである。当面の問題にとつてもつとも必要な情報は基盤岩層の種類（密度）およびその起伏状況である。同図中どの層が基盤に相当するかは明確でないが、ここでは第三紀層の最下面をもつて基盤への境界と考えることにしよう。新津東方山地に露出する古生層やそれを貫く花崗岩類がそれに該当することになる。

第 4 図がこの層の起伏を直接示すものではない。しかし同図中各地層の様相から推定すれば、基盤は新津地域から西へ向うにつれて次第に深くなり、向斜の様相を示しつつ弥彦・角田山塊において再び地表に迫っているものと思われる。最深部の位置は直接この図から読みとれないけれども、新津よりむしろ弥彦・角田寄りであり、そこでの深さは 3~5 km 程度以上であることは想像に難くない。

弥彦東縁に沿う東落ちの大断層は第 4 図に見られるもう 1 つの一次的特徴であつて、その落差は基盤において優に 2 km 以上に達するものと思われる。

このようにして、弥彦・角田一新津の線に沿う地下構造がかなり具体的に把握されているが、すでに述べた新潟の地下構造の特性を想起すると、粟島一村上の線に沿う地下構造も定性的にはこれに類似している可能性が濃い。

直接考察の対象である粟島一村上地域に眼を移すと、村上付近に花崗岩が露出している事実がまず挙げられる。さきに仮定したところによれば、これは基盤の露出と考えられる。粟島島体の主要部を形成する泥岩は、その意味では基盤とみなし難いが、島の東縁に花崗岩が僅かに露出している事実を重視すればここにおける基盤は事実上地表に届いていると



第 4 図 地下構造概念図 (弥彦・角田一新津) 石油資源開発株式会社の原因による。

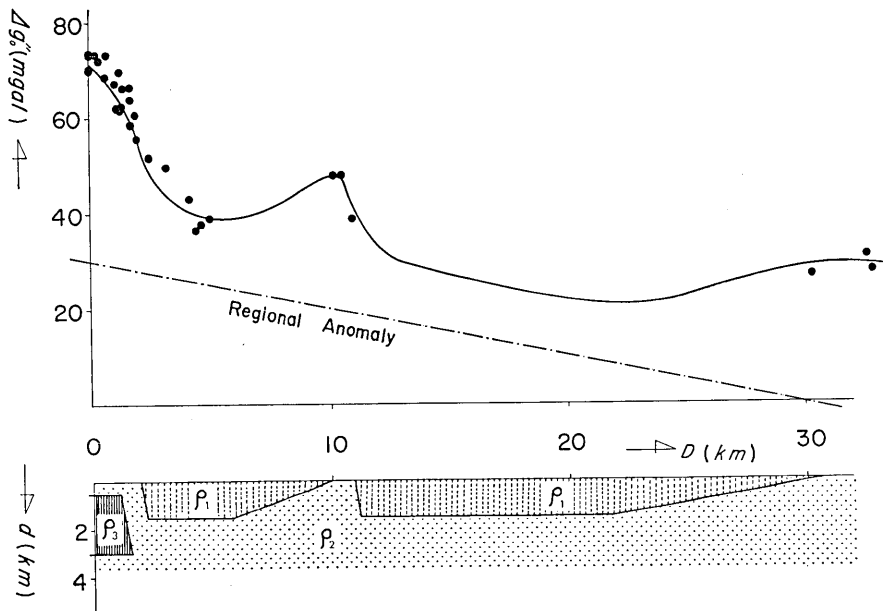
T: 塚山層, HA: 灰爪層, NI: 西山層, H: 浜忠層, SI: 椎谷層, TE: 寺泊層。

考えてさしつかえないであろう。粗粒玄武岩の貫入が島内各処に見られるのも注目に価する。

粟島海峡部の地下構造に関しては、本作業と同時期に行なわれたスパーカー探査（海洋研究所および地質調査所^{6,7)}）の結果が重視される。有効深度が海底下 100~200 m と考えられるスパーカー探査それ自体は基盤の起伏を捉えているわけではない。しかし、粟島島体と同質のものといわれる d 層⁸⁾ の分布は、基盤が粟島および以西海底の広範囲と、S3 を東縁とする帯状の狭い範囲とにおいて浅所まで迫っていることを暗示するし、a 層⁹⁾ の分布は堆積層が S3 以東において特に厚くなっていることを物語っている。

以上の情報または推測を念頭において重力異常を考察するわけであるが、観測結果（第 5 図上部の黒丸）には一見して次の特徴が認められる。

最も著るしいのは S2 付近に始まる左上りの傾向であつて、数 mgal/km に達するその勾配は粟島の西岸に至つてやや低下を示すに過ぎない。この傾向を外挿すれば重力異常値の極大は粟島西方沖合に位置するらしく、そこにおける値は S2 付近のそれを 40 mgal



第 5 図 粟島—村上地区の重力異常と、それに対する地下構造模型の 1 例

- 6) 奈須紀幸・加賀美英雄・木座栄一「粟島周辺の海底地下構造について」地震研究所第 425 回 談話会 (昭和 39 年 11 月) 講演。
- 7) 早川正巳 その他「新潟地震の震央付近における音波探査」地質ニュース 第 129 号 (1965), 1-11.
- 8) 5) に同じ。
- 9) 5) に同じ。

程度も上廻ることになるであろう。

第二の特徴は S3 に見られる左上りの傾向である。この地区では測定数が少ないので断定できないけれども、重力異常値の落差が前者の約 1/3 である反面、勾配は更に急なものと考えられる。村上・岩船地区の測定値は右上りの傾向を示しているが、その勾配も、また数値自体も前 2 者に比べてはるかに低いのが特徴である。

更に大局的に見れば、村上・岩船地区の値に対して粟島方面が格段に高い値を示していることがわかる。この大勢は恐らく Regional Anomaly に帰すべきものであろう。当海域におけるこの量を示す具体的資料は見当らないけれども、Bouguer 異常の局地的平均を示す金森の図にもとづいて 1 mgal/km と推定しておく(第 5 図に鎖線で示す)。したがって、観測結果からこの効果を差し引いた残りが以下の解析の対象となる。

観測資料の質・量から考えると、いたずらに詳細な模型を取り扱うことは無意味であろう。もつとも基本的な構造を考察する意味で、表層・基盤の 2 媒質系を仮定し、それぞれの密度を ρ_1, ρ_2 とする。基盤の内容は既に紹介されている通りであり、また、ここでいう表層は第三紀層から現世堆積物に至るまでを包含するものとする。このような事情を考慮して、 $\rho_2 - \rho_1$ を 0.40 と仮定しよう。

再び第 5 図を見ると、Regional Anomaly を前述の通り考慮に入れてもなお粟島地区の重力は本土側より約 10 mgal 高い。村上近傍では既に基盤が露出しているわけであるから、粟島の重力を説明するには ρ_2 より高密度の物質の存在を仮定しなければならない。その密度を ρ_3 とし、仮りに $\rho_3 - \rho_2 = 0.10$ として置く。

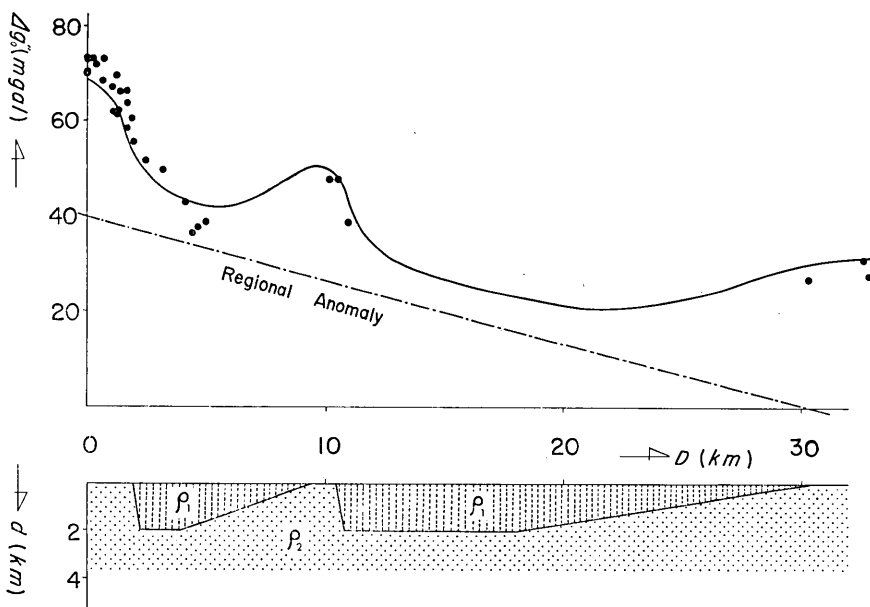
以上の準備にもとづいて、観測を説明出来る構造模型を取り扱うことにする。二次元的重力異常の問題に対する解法はすでにいくつか発表されている。今回の解析に先立つて筆者等も一つの図式解法を考察したので¹⁰⁾、これによつて模型の応答を観測と比較しつつ修正を重ねていった。

第 5 図下部は、このようにして求められた模型の一例を示すもので、その場合重力異常は同図上部の曲線のように期待される。同程度に観測を説明する模型はそのパラメーターを変えることによつて他にいくつも考えられるから、ここに提示されたのは単に 1 つの参考資料に過ぎない。

粟島の直下に ρ_3 の物質の集塊を仮定してあるが、これが事実とすれば同島に見られる粗粒玄武岩の大幅な貫入に関係あるものかも知れない。また、この物質の存在を仮定しない立場をとるならば、Regional Anomaly を粟島一本土間で 40 mgal 以上に引き上げなければならない。第 6 図は、仮りにそのそのような立場をとつて前記模型を修正した結果を示す。

これら 2 つの模型のいずれが真実に近いか、仮定した密度差が妥当であるか、あるいはそれから導かれた各層の厚さや起伏が実際とどう喰違つか——筆者等はこれらの疑問をこれ以上探究する資料を持っていない。明確な判定は将来別種の調査(例えば海上地震探査)

10) 萩原幸男・笠原慶一「二次元的地下構造の重力異常を求めるノモグラム」物理探鉱 19 (1966), 12-18.



第6図 粟島一村上地区の重力異常と、それに対する地下構造模型の1例
(Regional Anomaly を強調した場合)。

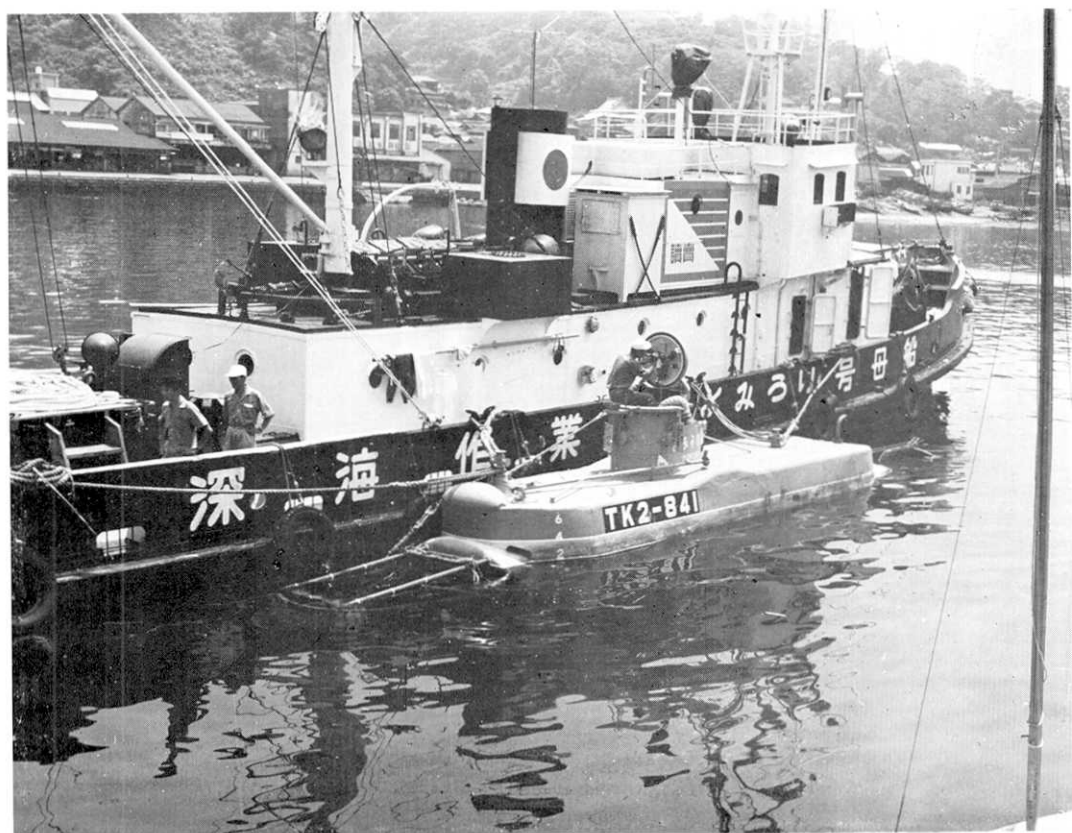
が行なわれる時に得られるであろう。

測定結果を見て気付くことであるが、S2 や S1 には S3 に相当するような重力の特徴が見当らない。海底変動やスパーカーに対する応答に関する限りではこれら3者の間に格別の差が認められなかつたこととあわせ考えると奇妙な感じがする、これも将来の研究にまつ問題点の1つである。

む す び

今回の調査が実施できたのは、新潟地震海底断層学術調査団の関係者および関係当局の御好意によるものであり、ここに厚く感謝の意を表す。そのうち地震研究所の森本良平教授、松田時彦・中村一明両助教授、並びに東京大学理学部の木村敏雄教授には現地での作業を通じて御世話になつたばかりでなく、測定資料を解析する上にも地質学的見地から有益な御教示をいただいた。海底測定作業に当つては「よみうり」号および同母船乗組員の御協力に負うところが極めて多く、また海上における関連作業については第2朝風丸乗組員および海上電機株式会社の渡辺忠良氏のお世話になつた。

更に海上保安庁水路部調査船には浮標位置決定および海底地形資料の入手について御配慮をいただいたほか、東京大学海洋研究所、工業技術院地質調査所の関係者からも貴重な資料の御提供を受けた。新潟平野の地下構造に関しては石油資源開発株式会社の御好意で未公開の図幅を参照することができた。ここに特記して謝意を表す。



第7図 深海作業船「よみうり」号とその母船



第8図 「よみうり」号船内の状況，操舵輪の後方台上に重力計を設置した。

15. *Gravity Surveys in Awashima Island and
at the Adjacent Sea Bottom.*

By Keichi KASAHARA, Yukio HAGIWARA, Hirokazu TAJIMA
and Kaoru KAWADA,
Earthquake Research Institute.

Gravity work as planned was carried out in August—September, 1964 as part of the submarine expedition for the earth's deformations associated with the Niigata earthquake. By use of a LaCoste and Romberg gravimeter, the writers surveyed gravity at 22 stations on the land and at 9 submarine stations located in the area where fault-like steps were discovered by echo-sounding. In the latter case, surveys were made with the gravimeter on board a small submarine boat which bottomed successively at gravity stations under the water.

The gravity anomaly pattern thus obtained seems to suggest geocynclinal structure of the Awashima Strait with its axis parallel to the major axis of Awashima Island. Evidence of buried fault-steps is also noticeable. A short discussion is added for the purpose of interpreting the observed anomaly by introducing a two-dimensional model of the underground structures across the surveyed area.