

報 文

550.831:551.215.6(265)

鬼界カルデラの重力異常

石原 丈実*

The Gravity Anomalies on the Kikai Caldera and its Vicinity

Takemi ISHIHARA

Abstract

The sea gravity survey was carried out by the geological research vessel Hakurei-Marui on and around the Kikai Caldera, southern Kyushu. The big low anomaly was revealed on the Kikai Caldera, which is some -25 mgal compared with the surrounding high anomalies. The feature of contours looks like concentric, but elongates to NW to SE direction a little.

The low anomaly was approximated to the concentric contours, and the density model is assumed the axial symmetry in the cylindrical coordinate. The models of the cones, the cylinders and the conical pedestal were numerically calculated. The conical pedestal model matched to contours the best. The mass deficiency of the Kikai Caldera was some 7.9×10^{10} ton. The low anomaly zone laid between the Kikai Caldera and the Ata Caldera. This zone was compared with the low anomaly zone between the Ata Caldera and the Aira Caldera.

要 旨

鬼界カルデラおよびそれと阿多カルデラの間の海域の重力測定を行った。

鬼界カルデラは周辺との差 -25 mgal の大きな低重力異常を示していて、その形状は同心円よりやや北西 - 南東に長く、また中心部の低重力値の部分が広いのが特徴である。重力異常を軸対称に近似してそれに合うモデルとして円錐、円柱、円錐台等 5 種を作った。

最もよく合うのは円錐台モデルである。

鬼界カルデラの質量欠損は 7.9×10^{10} ton である。

また円柱座標で軸対称の構造の重力異常を求める式が第 1 種完全楕円積分をふくむ式になることを示し数値計算を可能にして、上記モデルの計算方法を示した。

鬼界カルデラと阿多カルデラの間には低重力異常帯がある。これを鹿児島湾中部の阿多と姶良カルデラの間の低異常帯と比較した。

1. はじめに

鬼界カルデラは MATUMOTO (1943) によりその存在を指摘された。そして鬼界カルデラを南九州の 4 つの巨大カルデラ (阿蘇, 姶良, 阿多, 鬼界) の最南端に位置するものとして、海底の地形に基づき東西 23 km, 南北 16 km のほぼ楕円形の輪郭を示した。

小野・曾屋 (1975) はこの鬼界カルデラの形成に関する大規模な火砕流の噴出が少なくとも 2 回あったことを示した。

このカルデラは大部分が海域であるために北の 3 つの島, 硫黄島, 新硫黄島, 竹島で重力が測定されただけであり (横山ほか, 1966, および小川健三, 未発表), カルデラ全域の調査はなされておらず, 規模や構造について不明の点が多かった。

地質調査所が本海域を地質調査船「白嶺丸」により調査したのは 1975 年 1 月末であり, 南西諸島海域の調査 (航海番号 GH 75-1) の一部として行われた。その成果の速報は Cruise Report No. 6 (1976) として出版され

* 海洋地質部

ている。

この調査の中の鬼界カルデラ海域の重力測定をまとめて本文に述べる。

本海域の外の北側は佐多岬の西側から鹿児島湾の北部の始良カルデラに至るまで、CHUJO and MURAKAMI (1976) により海域の重力測定がなされており、本調査をまとめるにはこれらの成果と接続して行っている。YOKOYAMA (1975) は南九州陸上の重力測定を行っているので、本調査によって霧島火山から始良・阿多カルデラを経て鬼界カルデラにおよぶ地域がまとまることになる。また南九州から沖縄を経て石垣島に至る海域の重力測定は同一の航海 GH 75-1 および同じく地質調査所が「白嶺丸」により1975年7月より8月にかけて実施した調査の航海 GH 75-5 でなされており、20 mgal の粗いコンター間隔であるが報告されている (MURAKAMI, 1976)。硫黄島 (薩摩硫黄島) と竹島、新硫黄島の陸上の重力探査は小川健三技官により地熱探査の目的で狭い区域を高い精度で1976年に行われており、未出版のデータとして参照させて頂いた。

この報告に係わる原データの取得は本座栄一技官を中心とする調査班により行われた。

鹿児島湾の重力結果との接続に関しては村上文敏技官の協力をえた。地質的解釈については小野晃司・曾屋龍典両技官との検討に負っている。結果の総合的なまとめについては中条純輔技官に協力をえている。

2. 地形および地質の概説

2.1 海底地形

海底地形を第1図に示す。これは海図215号「薩摩硫黄島及び付近 1/35,000」と海図1222号「大隅海峡西部及び付近 1/200,000」をもとに作製した等深線にカルデラの輪郭を重ねている。カルデラの輪郭はMATUMOTO (1943) をもとにエアガンの調査の結果で修正したもの (SOYA *et al.*, 1976) で、前者のものよりも南東側にのびている。

カルデラの外側の地形は南部と南西部を除き概して起伏が少なく、カルデラの外側に向かって緩く傾斜している。この地形は阿蘇カルデラなど陸上のカルデラ地形とよく似ている。

カルデラの内側の地形は起伏に富み複雑である。竹島 (図上でTで示す) の南や、ヤクロ瀬Dの北と北東ではカルデラの底に向かって急崖をなすカルデラ壁が保存されている。中曾根A、浅瀬Bおよびシタキ曾根Cなどの瀬や堆は、硫黄島の稲村岳、硫黄岳および1934年に海面上に露われた新硫黄島と同様の後カルデラ火山 (中央

火口丘) であろう。

また竹島の南や硫黄島の南などに-400mから-500mに達する深い部分があり、広い範囲ではないが平坦な地形を示している。これはカルデラ底と考えられる。すなわち現在の海底地形はカルデラ縁の急崖に囲まれて-400m以深にカルデラ底があり、そのかなりの部分が多数の後カルデラ火山によって埋められたものである。

2.2 地質概説

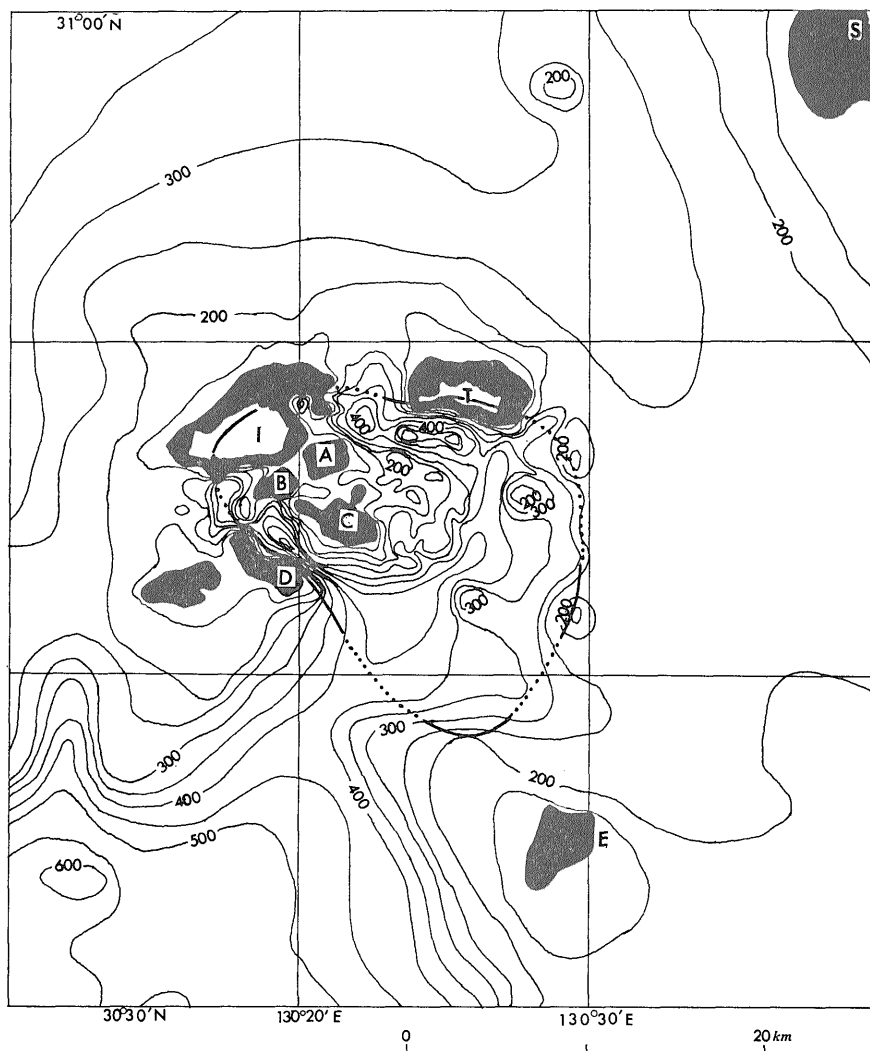
硫黄島と竹島は鬼界カルデラの北縁の一部をなし、竹島の南面と硫黄島の西部を北東-南西に走る崖とがカルデラ縁にあたる。両島の地質はMATUMOTO (1943) によって報告されているが、小野・曾屋 (1975) は以下のようにまとめた。

		硫黄島	竹島
第 四 紀	後カルデラ火山 (硫黄岳・稲村岳)		
	大浦火砕流		竹島火砕流
	カルデラ形成期の火砕岩		船倉降下軽石および火砕流
			コモリ港降下火山灰
	城原火砕岩		長瀬火砕流
	長浜流紋岩	小アビ山火砕流	
	矢筈山玄武岩	真米山玄武岩・高平山玄武岩	

すなわち硫黄島では開析の進んだ矢筈山火山を、竹島では真米山および高平山火山を基盤とし、その後長浜流紋岩 (硫黄島)、赤崎・崎ノ江鼻流紋岩 (竹島) の活動があった。カルデラ形成期には竹島のみにもみられる小規模なユニット (長瀬火砕流・コモリ港降下火山灰・船倉降下軽石および火砕流など) を除いて、両島に共通な2回の大規模な火砕流の活動があった。これら火砕岩の各ユニットの間にはすべて侵食をさむ時間間隔がある。また硫黄島と竹島で観察される限りすべての岩層は陸成であり、水中堆積の証拠はみとめられない。

後カルデラ火山の稲村岳は安山岩熔岩流を伴う比高240mのスコリア丘であり、硫黄岳はデイサイト熔岩とその崩壊物からなる比高704mの大きな山体をなしている。

新硫黄島 (昭和硫黄島) は1934年の海中噴火にともなって形成された中央火口丘の一つで (MATUMOTO, 1943)、ガラス質デイサイト熔岩から成っている。



50 m 間隔の等深線図. 0 m から 100 m までの間は塗り潰してある.
 T 竹島 (最高部 221 m), I 硫黄島 (最高部 706 m), S 佐多岬, A 中曾根 (最浅部 2.7 m), B 浅瀬 (最浅部 4.9 m), C シタキ曾根 (最浅部 13.1 m), D ヤクロ瀬 (最浅部 5.4 m), E サガリ曾根 (最浅部 38 m), 最深部は竹島南 1 Mile で水深 523 m.
 太線と点線は鬼界カルデラの輪郭.

第1図 海底地形図

3. 調査方法とデータの処理

3.1 調査の概要

調査は 1975 年 1 月 23 日から 24 日にかけて行われた。重力測定の測線長は約 190 km である。磁気測定も併行して行われた。エアガンによる音波探査も行われたが、スピーカーによるより精密な音波探査が計画されているので、ここでは省略した。測深は PDR (精密音響測深器, 周波数 12 kHz) による。

5 分間隔の測定結果を第 1 表に示す。

この表で地磁気異常値とは全磁力値から IGRF 1965.0 を差し引いたものである。

次に、船位の測定と重力測定について概要をのべる。

3.2 船位の測定

船位の決定は人工衛星航法装置 (マグナボックス社製モデル 200) を用い、人工衛星測位 (Satellite fix) と、電磁ログとジャイロコンパスによる推測航法で行った。推測航法を続けて次の人工衛星測位により生じた船位の

地質調査所月報 (第28巻 第9号)

第1表 調査海域のデータ表

時刻は JST で時分のみを示す。緯度・経度とも分のケタを示す。ブーゲー異常の密度仮定は 2.4 g/cm³。地磁気異常値は IGRF 1965.0 を引いた残差。

時刻 /月 23日	緯度	経度	水深	ブーゲー 異常値	単純ブーゲー 異常値	地形 補正值	ブーゲー 異常値	地磁気 全磁気値	地磁気 異常値
	30°	130°	m	mgal	mgal	mgal	mgal	γ	γ
1230	34.1'	21.7'	380	2.3	24.1	1.4	25.5		
35	35.2	21.5	356	9.1	29.5	1.7	31.2		
40	36.2	21.5	343	22.0	41.7	1.4	43.1		
45	37.3	21.4	296	28.5	45.5	1.6	47.1		
50	38.4	21.3	391	20.7	43.1	-0.1	43.0		
55	39.5	21.1	380	16.0	37.8	-0.3	37.5		
1300	40.6	21.0	376	15.3	36.9	-0.9	36.0		
05	41.6	20.8	560	15.1	47.3	-5.4	41.9		
1320	44.5	21.6	23	16.2	17.5	1.1	18.6		
25	45.1	22.2	170	15.9	25.7	0.3	26.0		
30	45.7	22.7	195	17.4	28.6	0.3	28.9		
35	46.2	23.2	222	14.8	27.5	0.3	27.8		
1600	45.6	23.4	215	13.5	25.8	0.5	26.3		
05	45.2	23.4	176	9.8	19.9	0.8	20.7		
1620	44.2	22.3	40	13.3	15.6	1.7	17.3		
25	44.1	21.3	88	15.2	20.3	1.6	21.9		
30	44.1	20.3	232	18.2	31.5	0.2	31.7		
35	44.1	19.3	475	27.1	54.4	-5.7	48.7		
40	44.1	18.3	73	47.0	51.2	1.0	52.2		
45	44.2	17.4	250	47.9	62.3	-1.0	61.3	45352	-391
50	44.2	16.4	125	46.4	53.6	0.5	54.1	45420	-327
55	44.2	15.4	152	44.5	53.2	0.3	53.5	45382	-370
1700	44.2	14.4	162					45394	-362
05	43.5	14.5	155					45498	-250
10	42.9	15.3	140	49.1	57.1	0.4	57.5	45280	-459
15	42.3	16.2	96	51.1	56.6	0.6	57.2	45495	-235
20	41.7	17.0	165	38.5	48.0	0.2	48.2	45435	-285
25	41.0	17.7	165	21.8	31.3	0.8	32.1	45492	-219
30	40.3	18.4	240	15.9	29.7	0.6	30.3	45460	-241
35	39.6	19.1	360					45525	-166
40	39.2	19.7	392					45483	-201
45	39.8	20.2	320					45547	-141
50	40.6	20.5	326	22.2	40.9	0.2	41.1	45831	136
55	41.5	20.9	335	19.8	39.0	0.2	39.2	45684	-17
1800	42.3	21.3	455	13.1	39.2	-2.8	36.4	45547	-161
05	43.1	21.7	315	7.6	25.7	0.1	25.8	45593	-121
10	43.9	22.2	125	10.4	17.6	1.1	18.7	45537	-182
15	44.7	22.7	200					45506	-219
20	45.2	23.5	185					45646	-80
25	45.4	24.5	225	4.7	17.6	0.7	18.3	45577	-146
30	45.7	25.6	263	9.6	24.7	1.0	25.7	45605	-116
35	45.9	26.6	403	9.2	32.6	-1.0	31.6	45598	-121
40	46.2	27.7	430	18.9	43.6	-1.6	42.0	45657	-60
45	46.4	28.8	278	26.6	42.6	0.4	43.0	45544	-170
50	46.7	29.9	130	25.9	33.4	1.3	34.7	45681	-31
55	46.9	31.0	225	20.8	33.7	0.2	33.9	45568	-141
1900	47.2	32.0	238	11.2	24.9	0.0	24.9	45473	-234
05	47.5	33.1	240					45516	-190
10	47.7	33.6	240					45542	-163
15	47.8	34.1	240	12.9	26.7	0.0	26.7	45558	-146
20	48.0	34.5	240	12.3	26.1	0.0	26.1	45568	-136
25	48.1	35.0	240	19.1	32.9	0.0	32.9	45569	-134
30	48.3	35.5	235	22.2	35.7	0.0	35.7	45569	-133

鬼界カルデラの重力異常 (石原丈実)

第1表 つづき

時刻 /月 23日	緯度	経度	水深	フリーア 異常値	単線ゲー 異常値	地形 補正值	ゲー 異常値	地磁気 全磁力値	地磁気 異常値
	30°	130°	m	mgal	mgal	mgal	mgal	γ	γ
1935	48.5	36.1	230					45573	-129
40	48.7	36.5	230					45566	-136
45	49.0	36.5	230					45563	-143
50	49.1	36.2	225	27.3	40.2	0.2	40.4	45574	-134
55	49.1	35.9	225	25.3	38.2	0.2	38.4	45585	-123
2000	49.0	35.7	230	23.2	36.4	0.2	36.6	45581	-127
05	48.9	35.4	230	22.6	35.8	0.1	35.9	45586	-123
10	48.9	35.2	235	22.4	35.9	0.1	36.0	45586	-124
15	48.8	34.9	235	20.2	33.7	0.1	33.8	45584	-126
20	48.8	34.6	240	25.2	39.0	0.1	39.1	45571	-140
25	48.7	34.1	240					45572	-141
30	48.6	33.2	240					45549	-167
35	48.0	32.8	240					45538	-173
40	47.1	32.9	235					45532	-171
45	46.2	32.9	230	14.8	28.0	0.1	28.1	45535	-159
50	45.4	32.8	225	16.0	28.9	0.1	29.0	45516	-171
55	44.6	32.7	215	19.2	31.5	0.2	31.7	45562	-117
2100	43.7	32.6	207	17.4	29.3	0.2	29.5	45558	-114
05	42.9	32.5	200	18.2	29.7	0.3	30.0	45544	-120
10	42.0	32.4	195					45523	-133
15	41.3	32.0	195					45486	-165
20	41.5	31.1	195	19.3	30.5	0.3	30.8	45475	-181
25	41.6	30.3	188	16.9	27.7	0.5	28.2	45498	-164
30	41.8	29.4	142	17.7	25.9	1.1	27.0	45393	-275
35	42.0	28.5	285	17.2	33.6	0.0	33.6	45571	-102
40	42.2	27.6	325	10.0	28.7	-0.2	28.5	45581	-98
45	42.3	27.0	335					45618	-65
50	42.0	26.7	345					45661	-20
55	41.2	26.6	390	6.7	29.1	-1.1	28.0	45703	29
2200	40.4	26.5	405	3.5	26.8	-1.2	25.6	45592	-74
05	39.6	26.4	380	6.0	27.8	-0.8	27.0	45507	-152
10	38.8	26.4	305	16.8	34.3	0.3	34.6	45478	-173
15	37.9	26.3	195	25.3	36.5	1.0	37.5	45608	-35
20	37.1	26.3	175	27.2	37.2	0.6	37.8	45712	76
25	36.5	26.3	180	27.9	38.2	0.4	38.6	45887	258
30	35.7	26.3	185					45762	140
35	35.3	25.8	205					45614	-6
40	35.5	24.9	265					45670	44
45	36.0	24.2	295					45725	91
50	36.8	24.4	210					45967	326
55	37.6	24.5	225	15.9	28.8	0.8	29.6	45430	-218
2300	38.4	24.5	267	8.4	23.7	0.6	24.3	45515	-141
05	39.3	24.5	380	-1.3	20.5	-0.5	20.0	45531	-133
10	40.1	24.4	390	-4.6	17.8	-0.1	17.7	45580	-93
15	41.0	24.2	420	-3.6	20.5	-0.5	20.0	45587	-95
20	41.8	24.2	475	-6.9	20.4	-2.3	18.1	45484	-206
25	42.6	24.2	420	-5.0	19.1	-1.1	18.0	45536	-162
30	43.5	24.2	325	0.1	18.8	-0.1	18.7	45533	-173
35	44.3	24.3	250	2.0	16.4	0.7	17.1	45542	-172
40	45.2	24.3	230	5.9	19.1	0.6	19.7	45599	-123
45	46.0	24.4	200					45475	-255
50	46.7	23.8	315	12.4	30.5	-0.2	30.3	45379	-360
55	47.3	23.0	485	14.5	42.3	-3.8	38.5	45210	-538

第1表 つづき

時刻 /月 24日	緯度	経度	水深	フリーエア 異常値	単純ブーゲー 異常値	地形 補正值	ブーゲー 異常値	地磁気 全磁力値	地磁気 異常値
	30°	130°	m	mgal	mgal	mgal	mgal	γ	γ
0000	47.9	22.2	355	14.0	34.4	-1.8	32.6	45239	-518
05	48.6	21.7	330					45430	-336
10	49.4	21.9	245	28.2	42.3	-0.4	41.9	45539	-234
15	50.3	22.1	185	30.7	41.3	0.2	41.5	45571	-209
20	51.1	22.3	160	27.9	37.1	0.4	37.5	45598	-190
25	51.9	22.5	188	24.9	35.7	0.4	36.1	45629	-166
30	52.8	22.7	217	22.1	34.6	0.4	35.0	45652	-150
35	53.6	23.0	255					45665	-144
40	53.7	23.9	260	14.5	29.4	0.2	29.6	45673	-133
45	53.7	24.9	270	14.4	29.9	0.0	29.9	45671	-131
50	53.7	25.8	275	14.8	30.6	0.0	30.6	45684	-113
55	53.6	26.8	273	12.7	28.4	0.0	28.4	45675	-117
0100	53.6	27.8	280	11.9	28.0	-0.1	27.9	45660	-128
05	53.6	28.7	280	14.6	30.7	-0.1	30.6	45642	-141
10	53.6	29.6	275	16.3	32.1	-0.1	32.0	45643	-137
15	53.9	30.5	270	13.3	28.8	0.0	28.8	45679	-100
20	53.9	31.5	212	15.8	28.0	1.1	29.1	45686	-89
25	53.9	32.4	255	22.1	36.7	0.0	36.7	45692	-78
30	53.8	33.3	245	25.1	39.2	0.0	39.2	45692	-74
35	53.8	34.3	235	26.8	40.3	0.0	40.3	45683	-78
40	53.7	35.2	220	29.7	42.3	0.1	42.4	45679	-77
45	53.6	36.1	200	36.7	48.2	0.2	48.4	45673	-78
50	53.5	37.0	175	40.9	50.9	0.2	51.1	45668	-78
55	53.4	37.9	155	44.8	53.7	0.2	53.9	45658	-83

ズレは、船上の電子計算機により、測定後にオフラインで潮流の再計算を行って修正している（この位置修正計算は post analysis と呼ばれる）。

人工衛星測位自身は0.1海里程度の精度があるが、全体の船位の誤差は0.2-0.3海里程度と思われる。

第2図は本調査の測線図である。5分ごとの位置を黒丸で示し通過時刻を記入した。

これによって鬼界カルデラのほぼ全域をふくむ1,100km²程度をカバーしている。測線長と面積の比率は5.8km²/kmになる。

3.3 重力測定

重力測定にはラコスト社製船上重力計を用いた。船の動揺による水平方向の加速度の影響を排除するためジャイロコンパスを用いた水平安定台上で測定し、また上下方向の加速度の影響を排除して重力値だけを取り出すために3分以上の周期の成分だけを残す低域通過フィルターを通して。得られた重力値は数値化されて、磁力値、水深などの測定値とともに人工衛星航法装置に送られ、磁気テープに集録される。このデータ集録した磁気テープをオフラインの電子計算機を用いて後ののべるデータ処理を行っている。

船が進行方向を変えたり、船速が変わったりした場合には、その直後、センサーの水平が保てず、重力値の精度が落ちるので、変わった直後5-10分間のデータは取

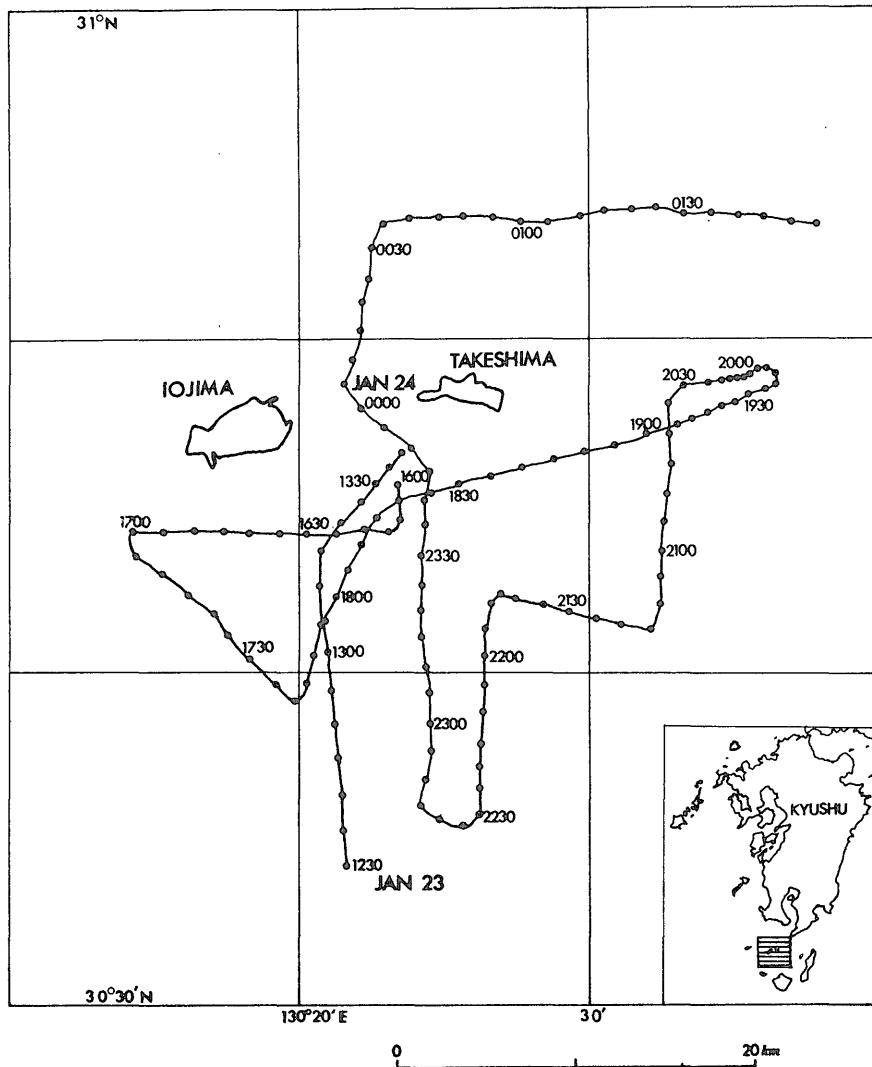
り除いた。

前に示したデータ表ではその時刻の重力関係のデータを空白にしている。

重力異常の計算の手順は次のようである。

- 1) 白嶺丸の専用埠頭のある千葉県船橋港で陸上で測定された重力値と接続して、相対値から絶対値になおす。
- 2) 人工衛星航法装置に集録される船速と方位・緯度のデータをもとに、エトベス補正を行い、船がその位置に静止している場合に観測されるべき重力値を計算する。
- 3) 緯度補正を行い、フリーエア異常値を計算する。
- 4) 測深器 PDR で得られた水深（デジタル量）を用いて、単純ブーゲー補正を行う。水の密度を1.03gr/cm³、岩石の密度2.4gr/cm³として計算した。第1表の単純ブーゲー異常値が補正された値である。
- 5) 海底地形の地形補正を行う。地形補正は、緯度30°25'Nから31°Nまで1.0'おき、経度130°Eから130°45'Eまで1.5'おきに水深を読みとり、観測点の周囲緯度4.0'、経度6.0'の範囲ではさらに半分の間隔で補間により水深を求めて計算した。

得られた重力値の総合的な精度は2-3mgal程度と思われる。したがって、第1表の重力異常の値で小数点以



地質調査船「白嶺丸」によりラコスト船上重力計を用いて重力測定を行った。測線長約 190 km。

第 2 図 測 線 図

下は物理的な意味がない。

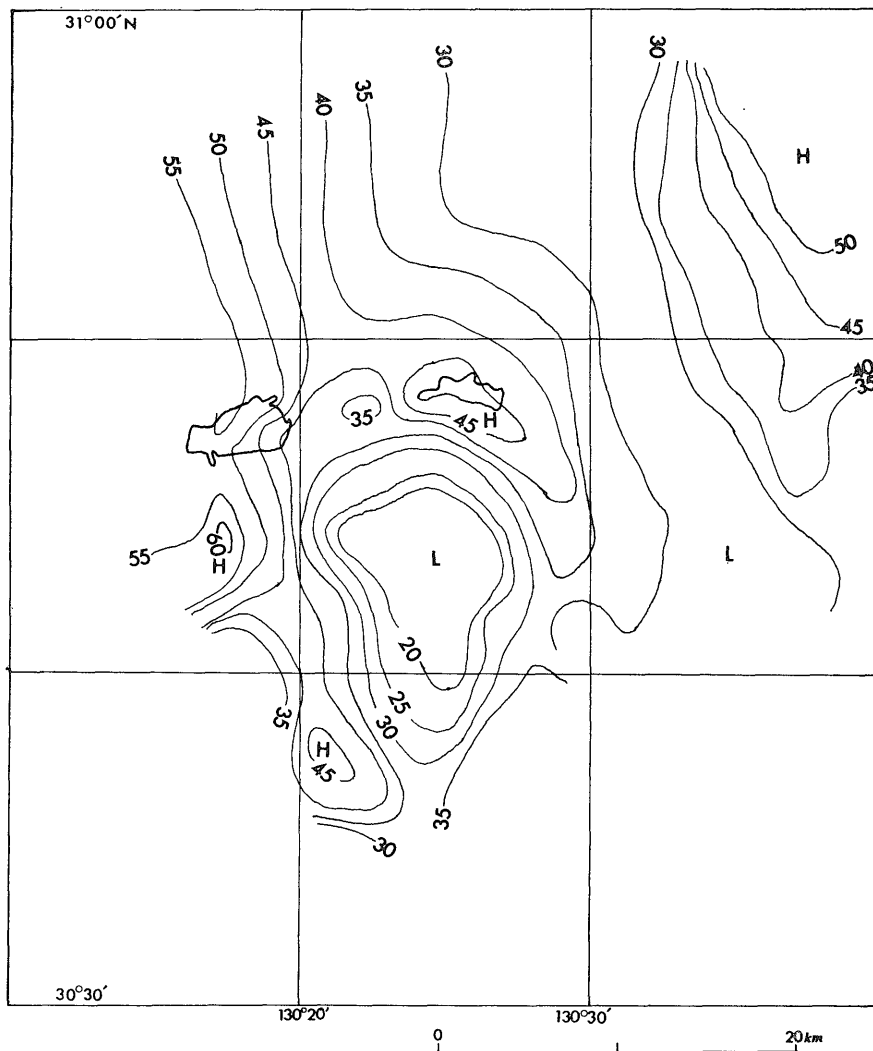
4. 本海域の重力異常

鬼界カルデラのブーゲー重力異常図を第 3 図に示す。図の作成にあたっては、本調査のほかに白嶺丸の 1975 年 7 月-8 月の航海で行った調査結果および本所が全国各地熱基礎調査の一環として 1976 年 1 月-2 月に実施した硫黄島・新硫黄島・竹島の陸上における重力探査の結果もあわせて用いている。

重力異常図は竹島の南にかなり明瞭な低重力異常の存在を示しており、これが鬼界カルデラに関係する異常で

ある。低重力異常の中心は 17.1 mgal であり、20 mgal 以下の区域がかなり広い。このように底の平らな重力異常の形状は始良や阿多カルデラにはない特徴的なことである。これは後述のモデル計算で逆円錐台という形状につながる。

ブーゲー異常の解釈を第 4 図に示す。鬼界カルデラの縁を Kic で示す。低重力異常の形はカルデラの輪郭と似ており、カルデラ縁は重力異常の極大の位置とわりあいよく一致している。これによるとカルデラ縁の形状はほぼ楕円形に近く北西-南東に長くて約 23 km、北東-南西に短く約 16 km 程度である。



等重力線間隔 5 mgal, ブーゲー補正の密度 2.4 g/cm³.

第 3 図 ブーゲー重力異常図

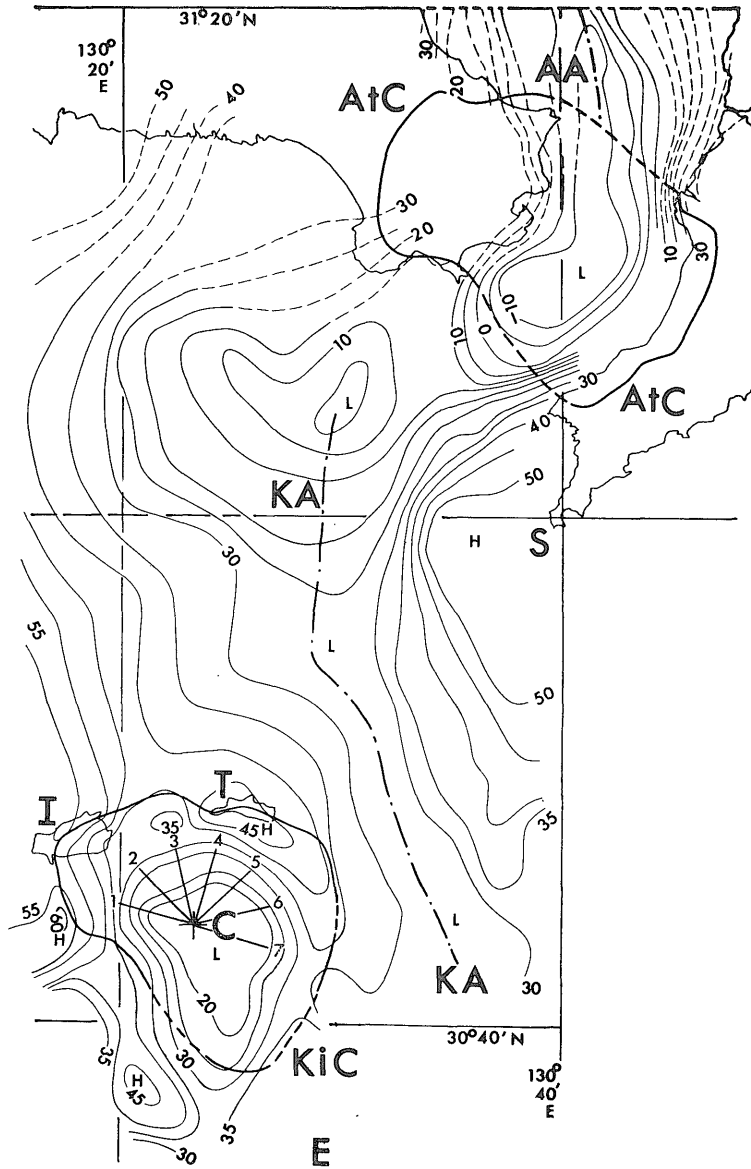
カルデラ縁の重力異常の極大値は場所によってかなり異なっている。西側から北側にかけては極大値は大きく、ヤクロ瀬の西では 60 mgal を越すところもある。それに対し、東側から南側にかけては 30 mgal 強で、カルデラを中心との重力異常差が 15 mgal 程度といったところもある。これはカルデラの北側に見られるような、西側が高く東側が低いという規模の大きな重力異常の傾向の上に、カルデラの重力異常がのっているためである。この傾向は阿蘇山から吐噺列島に至る広い区域で東西 100 km ぐらいの幅の中での一般的な傾向といえる。鹿児島湾中部では N80°E 向きに 0.28 mgal/km で

重力傾度が落ち、また始良カルデラの北ではほぼ東落ちに 0.24 mgal/km であった (中条・村上, 1976)。鬼界カルデラにおいても基盤が西から東に落ちていると思われる。カルデラの等重力線は同心円の形に近く、特に北側では比較的同心円に近いが、南側では、低異常の部分に舌状につき出した形になっている。

比較的同心円に近いカルデラ北部について、第 4 図の C 点を中心として N75°W から 30° おきに 7 直線上の重力異常プロファイルを示したものが第 5 図である。

各プロファイルはかなり異なっており、途中で重力異常の極小値を作ってから再度高くなるようなプロファイ

鬼界カルデラの重力異常 (石原丈実)



I・硫黄島, T・竹島, S・佐多岬, E・サガリ曾根; H・高重力異常, L・低重力異常, 等重力線・5 mgal 間隔; AtC・阿多カルデラ, KiC・鬼界カルデラ, C・鬼界カルデラの中心, 太線・カルデラの縁; AA・鹿児島湾中部の低異常の軸, KA・阿多-鬼界間の低異常の軸, 鎖線・低異常の軸。

第4図 プーゲー異常の解釈図

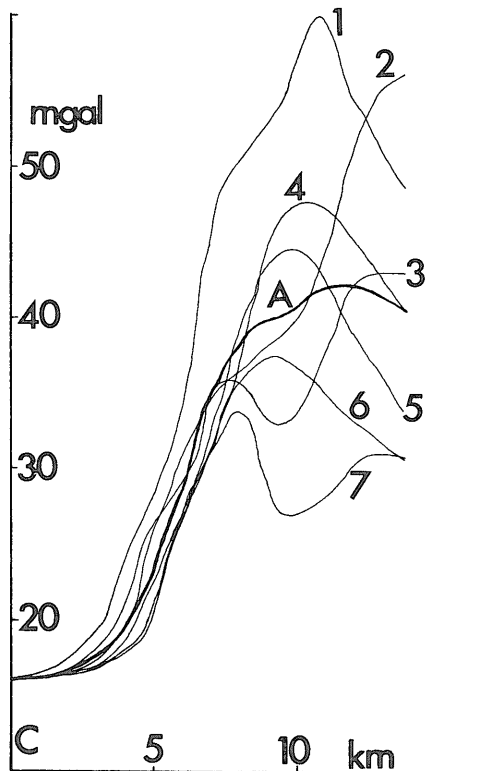
ルもある。しかし、中心付近でかなり平らになる点は共通である。

この7プロファイルの平均を太い実線Aで示した。カルデラ縁での最大値とカルデラ中心での最小値との差は25 mgal である。この値は阿蘇カルデラ (20 mgal) と始良カルデラ (30 mgal) のちょうど中間にあたり、屈斜路カルデラ (46 mgal) よりかなり小さい (YOKOYAMA,

1963)。このプロファイルから軸対称の重力異常を仮定して、ガウスの定理,

$$2\pi G \Delta M = \int \Delta g dS$$

(ここで G は万有引力定数, $\int dS$ は面積分, Δg はまわりの部分との重力異常差) によって質量欠損 ΔM を求めてみると、約 7.9×10^{10} ton となる。



カルデラの中心 C から放射状にとったプロファイル 1-7 とその平均値 A。
 プロファイル 1 は中心 C から西へ N75°W の方向にとり、他のプロファイルはこれより時計回りに 30° ごとの方角で、180° の間を切っている。
 中心 C の値は 17.1 m gal。側壁の重力傾度は約 6 m gal/km。カルデラ縁の最大値と中心 C の差は 25 m gal。

第 5 図 鬼界カルデラの重力プロファイル

YOKOYAMA (1958, 1963) によれば、これはほぼ屈斜路カルデラの質量欠損に匹敵し、始良カルデラより小さいが、阿蘇カルデラより大きい。

周辺との密度差を -0.3 g/cm^3 と仮定すればこの質量欠損は低密度部分の体積として 260 km^3 に相当する。

大隅半島南西端の佐多岬付近には四万十層群が露出し、これを中心に 50 m gal を越す高重力異常がある。この鬼界カルデラの間には $\text{N}20^\circ\text{W}$ 方向に軸をもつ低重力異常の谷がある。谷では 28 m gal 程度の値であり周辺との差は -20 m gal 程度である。この低異常の谷を北に伸ばせば開聞岳南の低異常 4 m gal に続き、南は未測定で分らない。この低異常の谷を KA と表わす。これは鹿児島湾中部の低異常の谷 (これを AA と表わす) と類似点があるので以下に比較してみる。

1. AA は始良カルデラと阿多カルデラの間にある。

KA は阿多カルデラと鬼界カルデラの間にある。

2. AA の軸は約 $\text{N}10^\circ\text{W}$, KA の軸は約 $\text{N}20^\circ\text{W}$ で方向がわりあい近い。
3. 低異常の軸はいずれもカルデラの中心からズレている。特に KA は阿多カルデラ、鬼界カルデラのいずれともひどくズレている。
4. AA は周辺との重力差が約 -50 m gal で大きい、KA は -20 m gal で小さい。また両側の重力傾度も AA が 5 m gal/km 程度なのに KA は 2 m gal/km で小さい。

上記のような類似点と相違点がある。

鹿児島湾中部の AA が地溝であることは音波探査からも確かめられている。本海域の KA は規模は小さいが地溝の可能性があり、今後の調査に待ちたい。

5. 軸対称モデルの重力異常

鬼界カルデラの重力異常は同心円状であり、従って同心円の中心に垂直軸をもつような円柱座標により軸対称の仮定で計算して重力異常の評価をすることができる。

この節ではこの目的で軸対称なモデルを作り重力異常を算出する計算手続について述べる。

円柱座標を (ρ, φ, z) とし、基準面 $z=0$ の上で中心から距離 r の点の重力異常を Δg とする。 Δg は軸対称であるから φ には関係ない。

Δg の一般式は質量素片 σdv の作る万有引力の鉛直成分を積分したものであるから

$$\Delta g = G\sigma \int \frac{\sin \theta}{r^2} dv$$

であり、ここで G は万有引力常数、 σ は重力モデルの密度差、 v はモデルの体積であり、 γ は体積素片と測定点の直距離、 θ は測定点から体積素片 dv を見る伏角である。

ここでモデルは上面が $z=z_1(\rho)$ 、下面が $z=z_2(\rho)$ の軸対称で、中心から半径 $\rho=a$ まで存在するとすれば前式は

$$\Delta g = G\sigma \int_0^a \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{z_1(\rho)}^{z_2(\rho)} \frac{z dz}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

となる。この式で R は測定点 $(r, 0, 0)$ とモデル内の点 (ρ, φ, z) の基準面への投影点 $(\rho, \varphi, 0)$ との間の距離であり

$$R = \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \varphi}$$

である。従って $(r, 0, 0)$ と (ρ, φ, z) の距離 γ は $\sqrt{z^2 + R^2}$ で表わされる。

z についての積分を実行すると

$$\Delta g = G\sigma \int_0^a \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\varphi \left[\frac{1}{\sqrt{R^2 + z_1^2(\rho)}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + z_2^2(\rho)}} \right]$$

となる。φ についての積分は括弧の中の2項それぞれ、第1種完全楕円積分 $K(x)$ を用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{z^2 + r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \varphi}} \\ &= \frac{2}{\sqrt{(r+\rho)^2 + z^2}} \int_0^\pi \frac{d\varphi'}{\sqrt{1 - \frac{4r\rho}{(r+\rho)^2 + z^2} \cos^2 \varphi'}} \\ &= \frac{4}{\sqrt{(r+\rho)^2 + z^2}} K\left(\sqrt{\frac{4r\rho}{(r+\rho)^2 + z^2}}\right) \end{aligned}$$

したがって

$$\Delta g = 4G\sigma \int_0^a d\rho \left[\frac{\rho K(y_1)}{\sqrt{(r+\rho)^2 + z_1^2}} - \frac{\rho K(y_2)}{\sqrt{(r+\rho)^2 + z_2^2}} \right]$$

となる。

ここで a を単位とした長さの無次元化を行うため

$$x = \rho/a$$

$$k = r/a$$

$$\alpha_i(x) = z_i(\rho)/a$$

$$y_i(x) = \sqrt{\frac{4xk}{(x+k)^2 + (\alpha_i(x))^2}}$$

$$(i=1, 2)$$

とおく。

これを用いて

$$\Delta g = 2G\sigma a \int_0^1 \sqrt{\frac{x}{k}} dx [y_1 K(y_1) - y_2 K(y_2)]$$

と表わすことができる。

モデルの上面、下面に対応して、 $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$ を与えてやることにより任意の軸対称のモデルに対する重力異常を数値積分で求める式ができた。

上面が地表にある場合 ($\alpha_1(x)=0$) の簡単なモデルについて、下面の式 $\alpha_2(x)$ を求めてみると、

円柱の場合

円柱の半径は a 、深さ $\alpha_0 a$

$$\alpha_2(x) = \alpha_0$$

倒立円錐の場合

円錐の半径 a 、軸の深さ $\alpha_0 a$

$$\alpha_2(x) = \alpha_0(1-x)$$

倒立円錐台の場合

台の上面の半径 a 、台の深さ $\alpha_0 a$ 、

下面の半径 $(1-\alpha_1)a$

$$\alpha_2(x) = \alpha_0, \quad 0 \leq x \leq 1-\alpha_1$$

$$\alpha_2(x) = \alpha_0(1-x)/\alpha_1, \quad 1-\alpha_1 \leq x \leq 1$$

となる。

上面が地表の場合、 $x=k$ すなわち測定点の上で、 $y_1=1$ となり完全楕円積分 $K(y_1)$ が無限大になる。実際

の数値積分では $k \leq 1$ のとき、変換、

$$x = k + \exp(-|u|) \cdot \text{sign}(u)$$

を施してから行った。

特別な点として中心での重力異常は完全楕円積分が $\pi/2$ になるので数値積分を行わなくても解析的に求めることができる。

円柱の場合

$$\begin{aligned} \Delta g &= 2\pi G\sigma a \int_0^1 dx \left[1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + \alpha_0^2}} \right] \\ &= 2\pi G\sigma a (1 + \alpha_0 - \sqrt{1 + \alpha_0^2}) \end{aligned}$$

倒立円錐の場合

$$\begin{aligned} \Delta g &= 2\pi G\sigma a \int_0^1 dx \left[1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + \alpha_0^2(x-1)^2}} \right] \\ &= 2\pi G\sigma a \left[1 - \frac{1-\alpha_0}{\sqrt{1+\alpha_0^2}} - \frac{\alpha_0^2}{(1+\alpha_0^2)^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. \cdot \log \frac{\alpha_0^2 + \alpha_0 + 1 + (\alpha_0 + 1)\sqrt{1+\alpha_0^2}}{\alpha_0} \right]. \end{aligned}$$

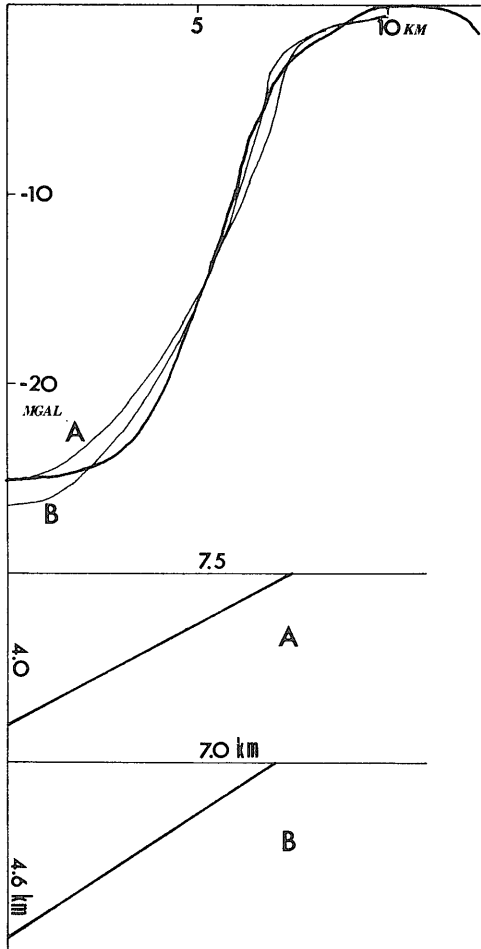
6. 鬼界カルデラの重力モデル

低重力異常型のカルデラでは、浅いすりばち型に低密度の fall-back が堆積して低重力異常が生じているという考えがある (横山, 1974)。

ここでは、この考えから出発して重力異常を軸対称とした平均曲線を説明しようようなモデルを考えてみた。軸対称のモデルを考えると、それによる重力異常は前節の完全楕円積分を用いた方法によって数値計算することができる。このモデルを考えるに当たって、低密度部分とまわりの基盤との密度差 σ を -0.3 g/cm^3 に仮定した。この値は実際に鬼界カルデラの岩石の試料によって確かめたわけではないが、YOKOYAMA (1958) などに用いられており、妥当な値であろうと思う。

まず倒立円錐の場合を考えると、第6図のモデルAとBのように、カルデラの上面 (海面) での半径は 7-7.5 km、中心での深さは 4.0-4.6 km 程度のものが考えられる。計算結果は図に示すように重力異常の傾斜の最も急なところで傾斜が観測値より緩やかになる。観測の平均値では傾斜は約 6 mgal/km であるが、モデルの計算値はモデルAで 4 mgal/km、モデルBで 5 mgal/km 程度で緩やかである。

次に円柱のモデルを考えてみた。比較的観測値に合いそうなモデルを2例示したが、円柱のモデルでは、重力異常の傾斜の最も急なところの傾斜が観測値より急になり過ぎるようである (第7図)。円柱モデルによれば、カルデラの半径 5.5-6 km、底面までの深さは密度差によると思われるが、この場合は 2.3-2.5 km ということになる。

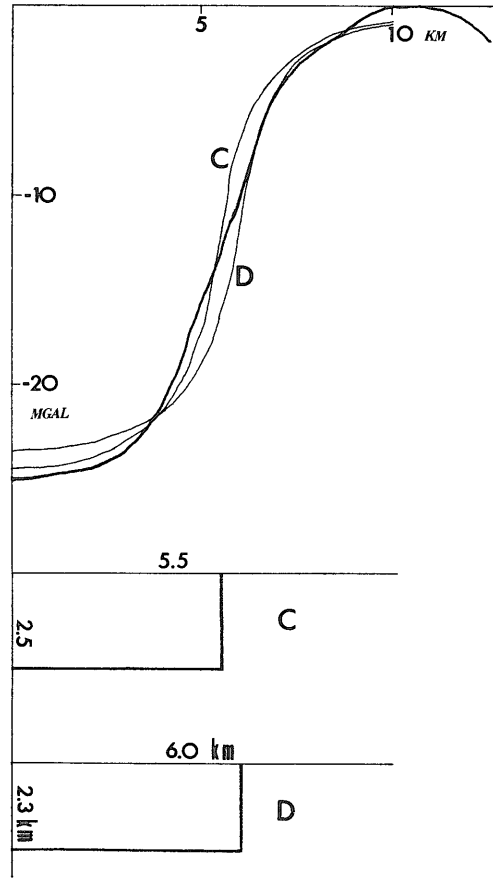


鬼界カルデラを垂直軸で軸対称な円錐と考えた A, B 2つのモデルを作り、モデルが作る重力異常を電算機で数値計算した。基盤と埋積物の密度差は -0.3 g/cm^3 とした。上図の太線は測定値の平均値、細線の A と B はモデルの重力異常値。

第6図 鬼界カルデラの円錐モデル

そこで、円柱と倒立円錐の中間的なモデルとして、倒立円錐台のモデルEについて考えてみた。最も観測値に合いそうなモデルは上面の半径 6.5 km、底面の半径 3.9 km、底面までの深さ 2.8 km である。重力異常の傾斜が急なところで、ほぼ観測値とあっており、カルデラ縁と中心で 0.5 mgal 程度異なっている (第8図)。

これらの各モデルを第2表にまとめた。AからEまでがそのモデルの形状と計算の合い具合であり、Fはモデルによらずにガウスの定理で求めた質量欠損である。各モデルとも F にくらべ数% 小さい程度でよく合っているが、計算の合い方だけに着目すれば円錐台モデルEが特に重力傾度の大きい部分でよく合っている。



第7図 円柱モデル

しかし測定精度 2-3 mgal, 位置測定の誤差, 密度差の仮定, 同心円に近似した誤差など諸種の誤差の原因を考えると、単に数値計算の適合性さえよければよいモデルであり正しい地下構造であると断定することは困難であらう。

おわりに

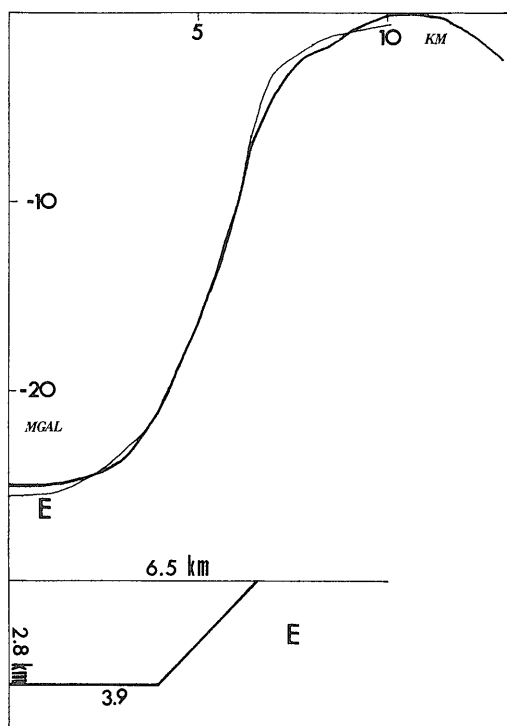
鬼界カルデラの重力測定を行い、カルデラの低重力異常とカルデラの北東の低重力異常帯につき述べた。またカルデラの等重力線を同心円で近似して地下構造のモデル計算をするために円柱座標の軸対称の場合の解析法を示し、数値計算を行った。

海域で大部分が海中に没したカルデラにはクラカトアのような例があるが、日本では鬼界カルデラが現在知られている唯一のものである。海域の地質情報は概して陸上のそれよりケタ違いに少ない。鬼界カルデラの重力探査が資料の少ないこのカルデラの地質構造を調べるに役

第2表 鬼界カルデラのモデルと計算の適合性

モデル	A	B	C	D	E	F
形状	円錐	円錐	円柱	円柱	円錐台	
上面の半径 (km)	7.5	7.0	5.5	6.0	6.5	
下面の半径 (km)	0	0	同上	同上	3.9	
深さ (km)	4.0	4.6	2.5	2.3	2.8	
壁面の傾斜角 (°)	28	33	90	90	47	
計算の合い方	—	適	—	—	最適	
体積 (km ³)	236	236	238	260	243	260
質量 (10 ¹⁰ ton)	7.1	7.1	7.1	7.8	7.3	7.9

- 1) 基盤と埋積物の密度差は -0.3 g/cm^3 としている。
- 2) F はモデル計算ではなく、ガウスの定理により求めた質量欠損と体積。



鬼界カルデラのモデルとしては数値計算の上で一番誤差が少なくよく合っている。密度差は円錐や円柱のモデルと同じく 0.3 g/cm^3 である。

第8図 円錐台モデル

立ったことは幸いである。またこの成果は未知の海底の火山やカルデラの研究にも役立つと期待される。

文献

CHUJO, J. and MURAKAMI, F. (1976) Geophysical preliminary survey of Kagoshima bay.

Cruise Report No. 6, Ryukyu Island Arc, p. 66-73.

中条純輔・村上文敏 (1976) 鹿児島湾の物理探査の予察。地質調月, vol. 27, p. 807-826.

MATUMOTO, T. (1943) The Four Gigantic Caldera Volcanoes of Kyusyu. *Japanese Jour. Geol. Geogra.*, vol. 19, Special no., p. 1-57.

MURAKAMI, F. (1976) Gravity survey of GH 75-5. *Cruise Report No. 6, Ryukyu Island Arc*, p. 44-51.

小野晃司・曾屋龍典 (1975) 鬼界カルデラ, 竹島, 硫黄島の地質 (演旨)。火山, 第2集, vol. 20, p. 185-186.

SOYA, T., OKUDA, Y., MURAKAMI, F. and HONZA, E. (1976) Geological Setting of the Kikai Caldera. *Cruise Report No. 6. Ryukyu Island Arc*, p. 27-30.

水路部 (1955) 海図 1222 号, 大隅海峡西部及び付近, 1/200,00.

—— (1969) 海図 215 号, 薩摩硫黄島及び付近, 1/35,000.

YOKOYAMA, I. (1958) Gravity Survey on Kuttyaro Caldera Lake. *Jour. Phys. Earth.*, vol. 6, p. 75-79.

—— (1963) Structure of Caldera and Gravity Anomaly. *Bull. Volcanol.*, vol. 26, p. 67-72.

横山 泉 (1974) カルデラおよびその形成。地団研専報 18 号, p. 41-53.

YOKOYAMA, I. (1975) Gravity anomalies of the

volcanic regions in the southern Kyushu,
Japan. *National Report of the Geo-
dynamics Project Japan*, no. 5, p. 66-
67.

青野昌秋 (1966) 鹿児島県下硫黄島の地球
物理学的調査報告. 北大地物研報, 16 号,
p. 33-50.

横山 泉・清野政明・本谷義信・飯塚 進・牧 正・

(受付: 1976年11月24日; 受理: 1976年12月11日)