

重力の海域地形補正の導入

中山和男*

On the Sea-area Terrain Correction of Gravity

Kazuo NAKAYAMA*

Only the calculation of land topography has so far been made in the terrain correction of gravity. The sea-area terrain correction has been introduced into gravity values at stations around the Suruga Bay in the present investigation.

When the sea-area terrain correction is made only in the Suruga Bay, the largest correction value is obtained at the coast of the Izu Peninsula, and it amounts to about 6 mgals. When the correction off the Suruga Bay is added to that in the bay, it amounts to about 7 mgals.

Comparison of the simple Bouguer anomaly with the terrain corrected Bouguer anomaly on the Suruga Bay shows that the simple Bouguer correction is obviously overvalued above the submarine canyon.

As to the accuracy of the sea-area terrain correction, the water depth accuracy of less than 5% is necessary to calculate the sea-area terrain correction within 10% error. The sea-area terrain correction around Shizuoka, near which the sea bottom attains the depth of 2000m depth, needs the distance range of 70km, in order to obtain the correction value within 1 mgal error.

I. はじめに

重力測定点をジオイド上に引き直すためには、フリーエア補正、ブーゲー補正を行うが、測定点の周囲の地形による引力の影響を排除するために、地形補正を施す必要がある。海陸にまたがる重力異常を考える場合、陸上部はブーゲー異常、海上部はフリーエア異常の値をつなぐ場合が多いが、陸上部、海上部ともブーゲー異常にしてつなぐことも多く、この場合は当然海底地形についても地形補正を施すべきである。

しかし、従来の地形補正は陸上地形の影響のみを

扱っており、海底地形の影響はほとんど無視されていた。重力測定点が内陸奥地であれば、海域の影響は無視できるであろうが、比較的海に近い場所では海域の影響を少なからず受けるものと予想される。また、海上重力値についても単純ブーゲー補正值と海底の地形補正によるブーゲー補正值との差が、地下構造の推定を誤らせるかもしれない。

以下、重力測定値に対し、駿河湾を中心とした海域地形補正を施し、その影響を調べ、またその方法的な点に関して考察してみた。

II. 海域地形補正の概略

1. 海域地形補正の方法

海域地形補正の方法は、陸上における地形補正の方法を応用して行った。これは地形を四角柱で置き換え、その四角柱の引力を計算する。ここでは野崎(1981)に基づいた方法で行った。

具体的にいうと、陸上部は国土地理院の1/4メッシュ(1辺が約250m)地形データKS-110を地形補正用に再編集したものをを用い、海の部分は同じメッシュで海底地形を読み取ったデータを用いる。測定点を含むメッシュを除いて距離が7kmまでのメッシュについては、四角柱の引力厳密解で計算し、7~20kmの距離は線質量近似、つまり角柱の中心に四角柱の質量が集中していると近似して計算する。20km以遠においては、1/4メッシュを16個束ねた線質量近似で計算を行う。重力測定点を含むメッシュについては、陸上の重力測定点の場合五面体で地形を近似させるが、海上の重力点については特に地形を近似させることはせず、海面下に海底までの四角柱が存在するものとして計算する。陸上の地形補正の場合、勾配が60°近い急傾斜のところであっても2%以下で計算精度は保たれている(河野・久保, 1983)。

実際に海域地形補正を施す場合、測定点の標高から海底までを地殻と同じ密度の岩石で埋めたものとして計算するのだが、海水による引力を差し引き、海水の部分は地殻との密度差

$$\Delta\rho = 2.67\text{g/cm}^3 - 1.03\text{g/cm}^3 = 1.64\text{g/cm}^3 \dots\dots(1)$$

で補正する。

図1は海域地形補正のモデルであり、海面下についての四角柱の引力厳密解 Δg_{As} は、

$$\Delta g_{As} = G \cdot \Delta\rho(\Delta g_{Aa} - \Delta g_{Ai}) \dots\dots(2)$$

と表わされる。ここで、

$$\Delta g_{Aa} = f(x_2, y_2, h+d) - f(x_1, y_2, h+d) - f(x_2, y_1, h+d) + f(x_1, y_1, h+d) \dots\dots(3)$$

$$\Delta g_{Ai} = f(x_2, y_2, h) - f(x_1, y_2, h) - f(x_2, y_1, h) + f(x_1, y_1, h) \dots\dots(4)$$

$$f(x, y, z) = \left[x \cdot \log \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + y}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + y}} \cdot \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{x} \right) + y \cdot \log \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + x}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + x}} \cdot \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{y} \right) - h \cdot \tan^{-1} \frac{z \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{xy} + \frac{\pi}{2} z \right] \dots\dots(5)$$

G: 万有引力定数

である。一方、四角柱の線質量近似解 Δg_{Ls} は

$$\Delta g_{Ls} = G \cdot \Delta\rho(\Delta g_{La} - \Delta g_{Li}) \dots\dots(6)$$

であり、ここで

$$\Delta g_{La} = S_1 \cdot S_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (h+d)^2}} \right) \dots\dots(7)$$

$$\Delta g_{Li} = S_1 \cdot S_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) \dots\dots(8)$$

$$|x_2| > |x_1| \geq 0, |y_2| > |y_1| \geq 0$$

で表わされる。

また、地球は丸いので、測定点から遠ざかるほど測定点に対する平面よりも実際の標高は低くなることになる。地形補正を施す場合、この高度差を補正する必要があり、ここでは測定点から7km以遠において球面の補正を施す。これを図で表わしたものが図2であり、+印の個所の効果を加え、-印の個所は差し引いて行う。

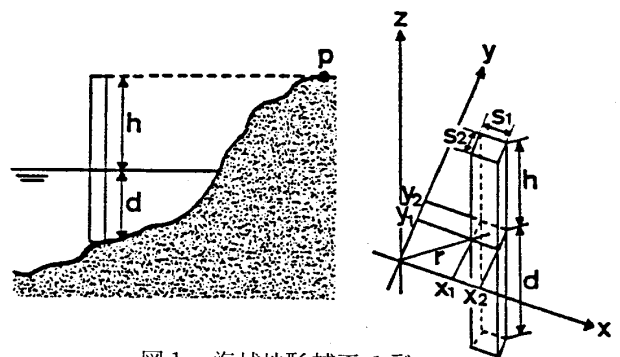


図1 海域地形補正モデル。

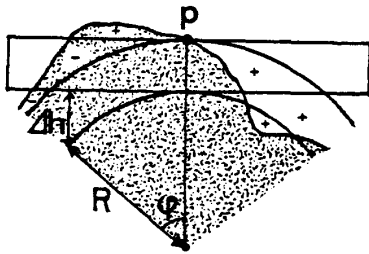


図2 球面地形補正図.

2. 駿河湾海底地形データ

駿河湾の海底地形データは、海上保安庁水路部発行の5万分の1の海底地形図から、国土地理院の陸上地形データKS-110と同じメッシュで、図3に示す範囲を読み取った。その点数は約5万点に及ぶ。

KS-110は2万5千分の1の地形図から読み取られており、誤差は極ね5m以内と考えられる。ここで問題となるのは陸上の地形図と海底の地形図との読み取り精度の差である。陸上地形データは地形図の縮尺などの点から海底地形データよりも優ってい

ると考えられる。利用した海底地形図には、水深1000mを超えるところで等深線が密集し、読み取った値には20~30mの誤差を含むと考えられるところがあるが、このような特殊な地域を除けば、水深は誤差10m以内で読み取られている。

III. 海域地形補正の導入

以上述べた方法を用い、まず駿河湾周囲の図4に☆印及び★印で示す地点で海域地形補正を施してみた。ここではできるだけ海水の影響を受けそうな沿岸の水準点、三角点を選んだ。その結果を表1および表2に示す。

水深を読み取った海域に限られているために、ここで得られた値をそのまま全海域の地形補正值とすることはできないが、得られた結果をみると、駿河湾西岸では0.1~1.0mgalであるのに対し、東岸の伊豆半島の沿岸では5mgal前後の大きな値を示した。この地域で大きな値を示す要因としては、伊豆半島

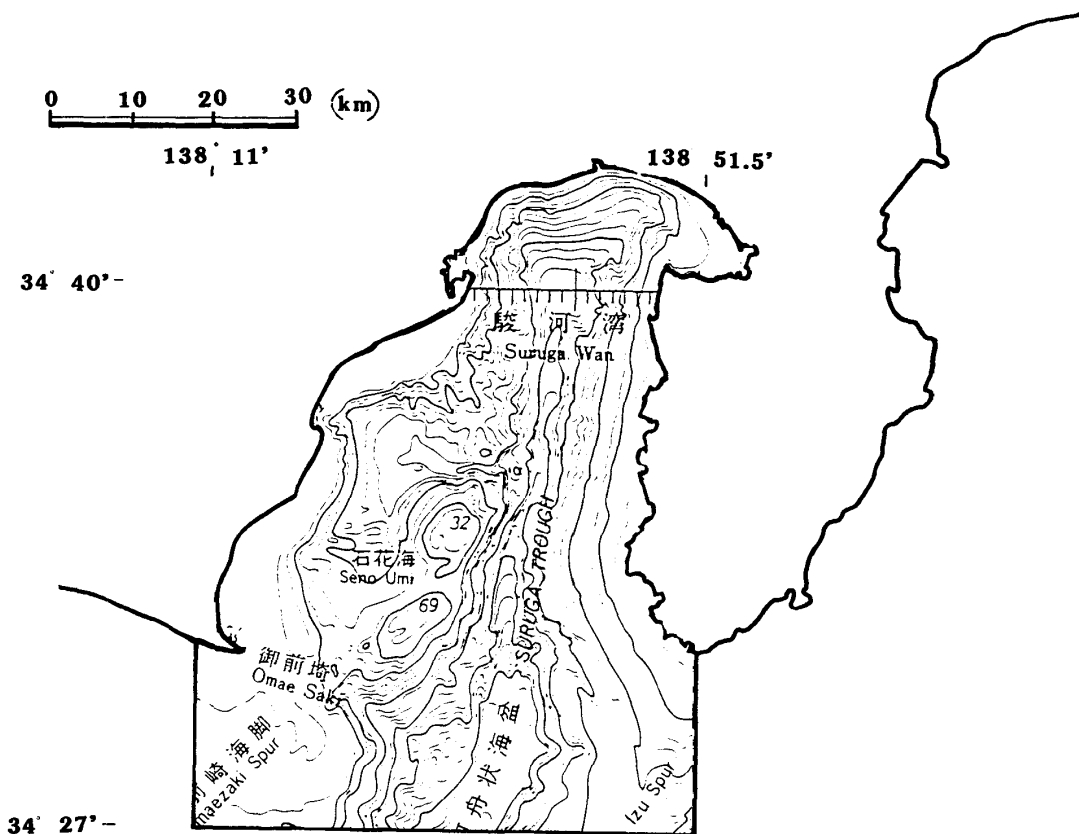


図3 海域地形補正領域(1).

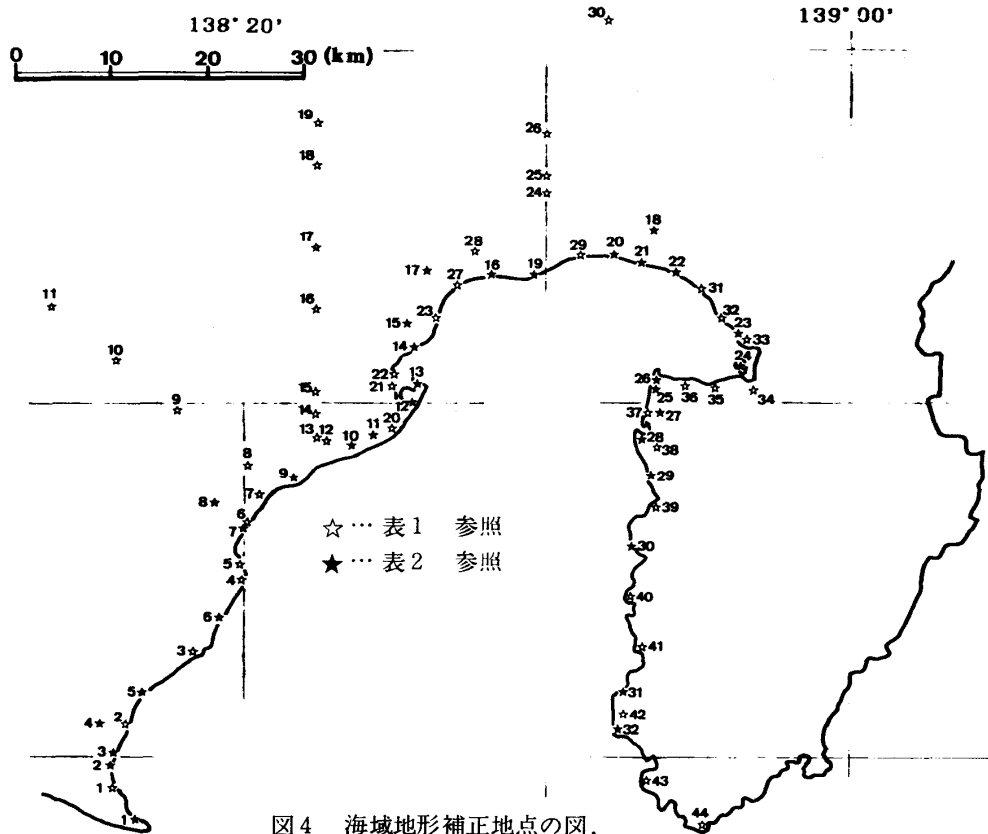


図4 海域地形補正地点の図.

沿岸の選んだ地点の標高が高いこと、および駿河湾東部が西部に比べ海底の傾斜が多少急になっているためと考えられる。

IV. 海域地形補正值の精度

1. 水深読み取り誤差による影響

次にこれらの補正值が水深の読み取りの際の誤差によって受ける影響を調べてみる。今回、海底地形データを読み取ったもとの地形図は10mごとの等深線が引かれており、読み取り誤差は大きく見積っても10m以下と考えられるので、海域地形補正值を計算した地点のうち図4に★印で示す地点について、駿河湾全域の水深を上下に10m変化させて地形補正值を計算してみた。その結果、最も大きな変化を示した地点もとの海域地形補正值に対するその割合を図5①に破線のエラーバーで示す。上下共に沼津沖の淡島(図4の★24)で最も大きな変化を示した。しかし、淡島は四方を海で囲まれた小さな島という特殊なところであり、また水深10m以下の

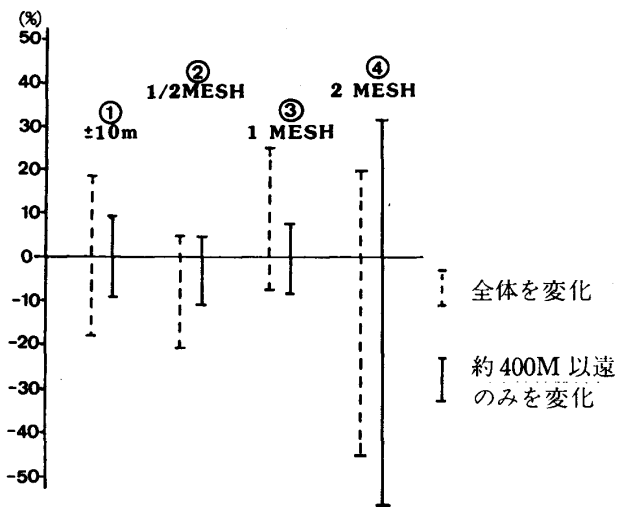


図5 1/4MESHに対するずれ.

ところまで10mもの水深の誤差があると考えerことはあまり意味がないので、各地点から約400m以内の水深の値(測定点を含むメッシュを中心とした9つの地形データメッシュ)は変化させず、その他の地域のみを±10m変化させて同様の計算を行ったのが図5①の実線のエラーバーである。

このとき、海域地形補正値は淡島で9%、その他の地点でも最大6%の変化を示すので、駿河湾周囲での海域地形補正値は特殊な地域を除き、6%以内の精度で求められているといえる。

以上、深度読み取り誤差による海域地形補正値の誤差の見積りを行ったが、次に、地形図そのものの精度について考えてみる。そこで、まず四角柱の引力に10%の違いが生じるときの水深の変化量を計算した。その結果を図6に示す。角柱との距離を遠くすると、各水深における変化(つまり10%以内におさえる許容範囲)は一定の値に近づく。この収束した値と水深とは図7に示すように比例関係にある。図7より、計算される引力を10%の誤差におさえるには水深を実際的水深の5%以下の誤差で測深されれば良いことになる。

海底の測深はこの5%という許容範囲を全く問題にする必要のない精度で行われており、海域地形補正を行うときの水深データの誤差については、海底地形図から水深を読み取るときの誤差のみが問題になることを示している。

2. メッシュサイズの変化による影響

駿河湾のように精密な5万分の1の海底地形図が発行されているのは、日本近海の中でもごく一部であり、一般にはより小縮尺の地図から水深を読み取ることになる。その場合、±10mの精度で水深を読み取ることにはできない。また、1/4メッシュの大きさで水深を読み取っても果たして意味があるのだろうかという問題が生じる。そこで駿河湾の海域地形補正のメッシュサイズをさまざまに変化させて補正計算を行ってみた。以下、各メッシュサイズにおける水深は、メッシュの中心の水深で代表させた。

まず、1/4メッシュの4倍の面積のメッシュデータで補正してみた。この場合のメッシュをここでは1/2メッシュと呼ぶことにする。水深を±10m変化させて計算した例と同様に、全海域を1/2メッシュデータに置き換えた場合と、測定点を含む9つのメッシュだけは1/4メッシュのままその外側のみを1/2メッシュに置き換えた場合とについて計算した。後者の場合、全体を1/4メッシュで計算した場合に比べて最大で10%の変化が生じた(図5②の実線エラー

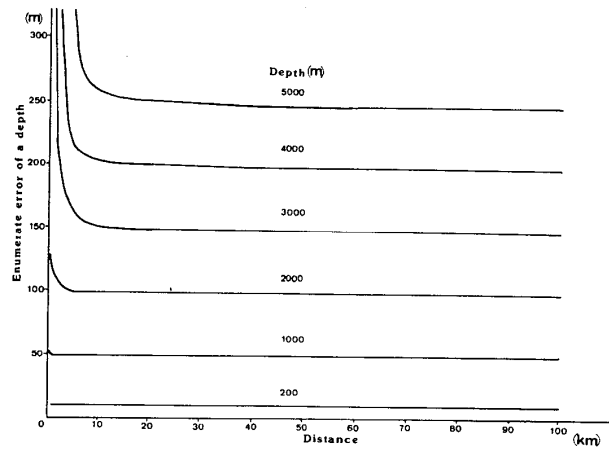


図6 四角柱引力に10%の誤差をもたらす水深差(1)。

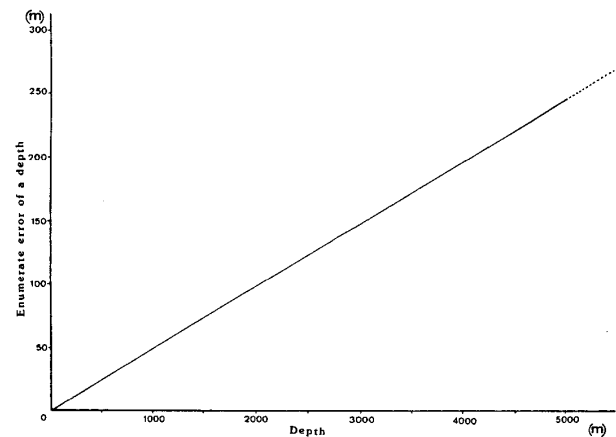


図7 四角柱引力に10%の誤差をもたらす水深差(2)。

バー)。

次に1/4メッシュの16倍の面積の1メッシュ(つまり3次地域区画)のデータで海域地形補正を行っても、地点の周囲さえ1/4メッシュデータで補正すれば10%のずれに収まっている(図5③の実線エラーバー)。

さらに1/4メッシュの64倍の面積である2メッシュのデータで補正してみると50%に近い変化が生じる場所があり、この場合には精度的に問題がある(図5④)。

以上のことから、メッシュの大きさは1/4メッシュが望ましいものの、1/2メッシュ、1メッシュのデータで海域地形補正を行う場合でも、測定点の周囲約400m四方だけは1/4メッシュデータで補正すれば、±10%前後の精度で海域地形補正の値が得られる。

3. 海域地形補正を施す範囲

海域地形補正はできる限り広範囲にわたって施すべきではあるが、現実にはその範囲のとり方にも限りがあるので、精度をあまり落とすことなく補正をするにはいったいどの程度の範囲までの海域地形補正をすれば良いのかを、モデルを用いて考えてみた。

まず図8に示すような地形を考える。P点より右側は標高0mの陸地、左側は水深d mの海域である。ここでP点について海域地形補正を施す範囲を半円状に広げて計算し、半無限平板の海水による引力と補正量との差が補正半径a mによってどう変化するかを調べてみた。この半無限平板の海水による引力と補正量との差 Δg_a は

$$\Delta g_a = \pi G \Delta \rho (\sqrt{a^2 + d^2} - a) \dots\dots\dots(9)$$

で表わされる。

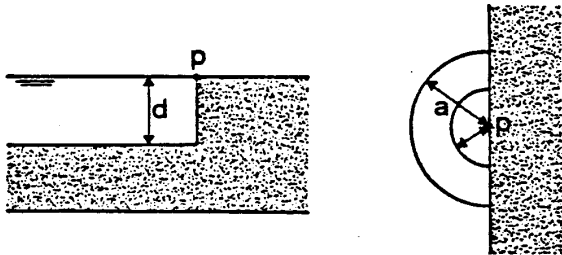


図8 半無限平板モデル。

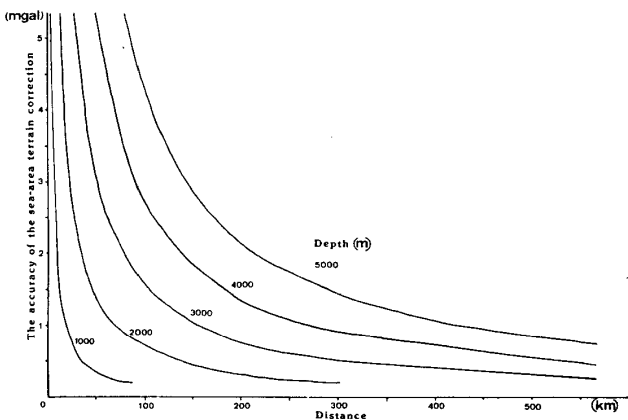


図9 半無限平板(海水)の引力と補正量との差。

水深を1000m, 2000m, 3000m, 4000m, 5000mとした場合の結果を図9に示す。静岡周辺の海域はおおよそ2000mの水深で広がっているため、図9と照らし合わせて考えてみると、1mgalの精度を要求す

るには約70kmにわたる範囲で海域地形補正をする必要がある。

しかし、ブーゲー異常値そのものを議論するのではなく、その地域の地下構造推定のため、相対的な値を議論するのであれば、当然海域地形補正の範囲も陸上地形補正を施す範囲に合わせるべきである。

V. 海域地形補正とブーゲー異常

以上の結果を踏まえ、海域地形補正量の大きい伊豆半島および駿河湾における実際の重力測定値に対し、海域地形補正を行った。伊豆半島の重力データは国土地理院のものを用い、駿河湾の重力データは友田(1972)のフリーエア異常図から読み取った値を用いた。これらの点を図10に示す。また、補正する海域も図11に示すように、相模湾の一部にまで拡大した。相模湾の水深は、海上保安庁水路部発行の10万分の1および20万分の1の海底地形図から1メッシュで読み取った値を使用した。

図12に陸上地形のみを補正し、海域については単純ブーゲー補正を施したブーゲー異常図を示す。また、図13に陸海共に海域地形補正をも施したブーゲー異常図を示す。陸上地形補正は半径80kmの領域で行った。なお、図13に示したブーゲー異常図の南端部付近では、水深データを読み取っていない地域についての地形補正の計算を実施していないので、若干の補正不足が考えられる。

以下、陸のブーゲー異常図及び海域のブーゲー異常図について、海域地形補正の影響を考察する。

1. 陸のブーゲー異常(伊豆半島)

伊豆半島の重力測定点における海域地形補正量は、1~3 mgal程度であり図12と図13を見比べてもあまり変化はみられない。ここで海岸線における海域の影響をより詳しく調べるために、図12・図13の中に a - a' で示す北緯34°52'におけるブーゲー異常の断面図を描いてみた。図14にそれを示す。ただし、海域地形補正を行っていない方の海域の断面は、通常よく用いられるようにフリーエア異常を用いた。この図では海岸線で約4mgalの差、つまり海域地形補正値が約4mgalであることを示して

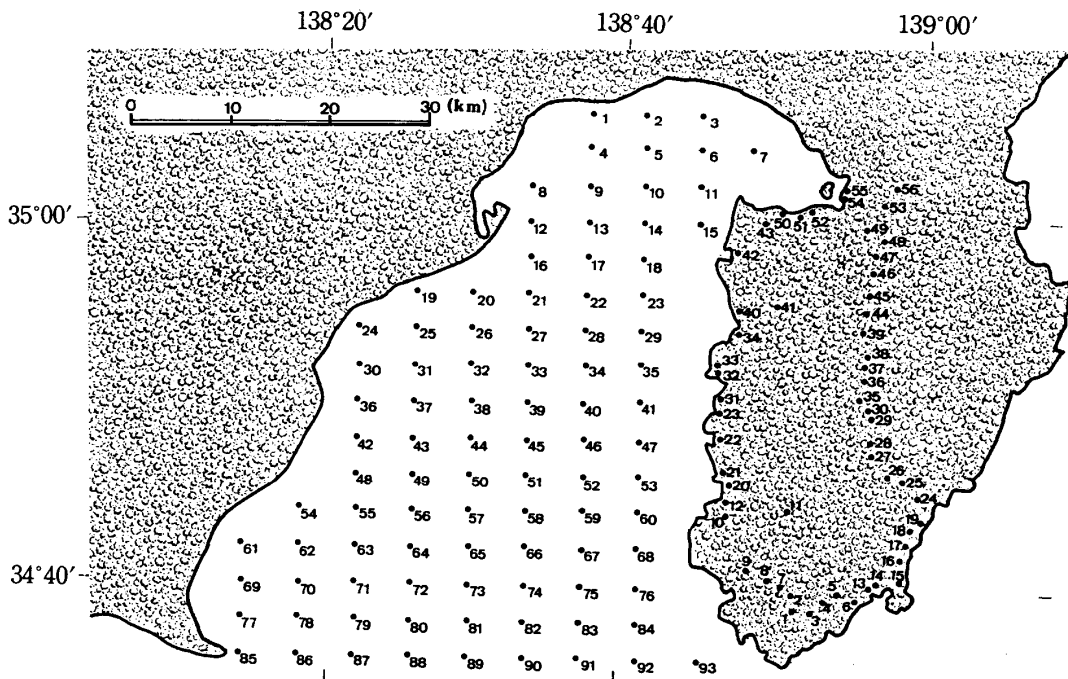


図10 伊豆半島および駿河湾上の重力測定点.

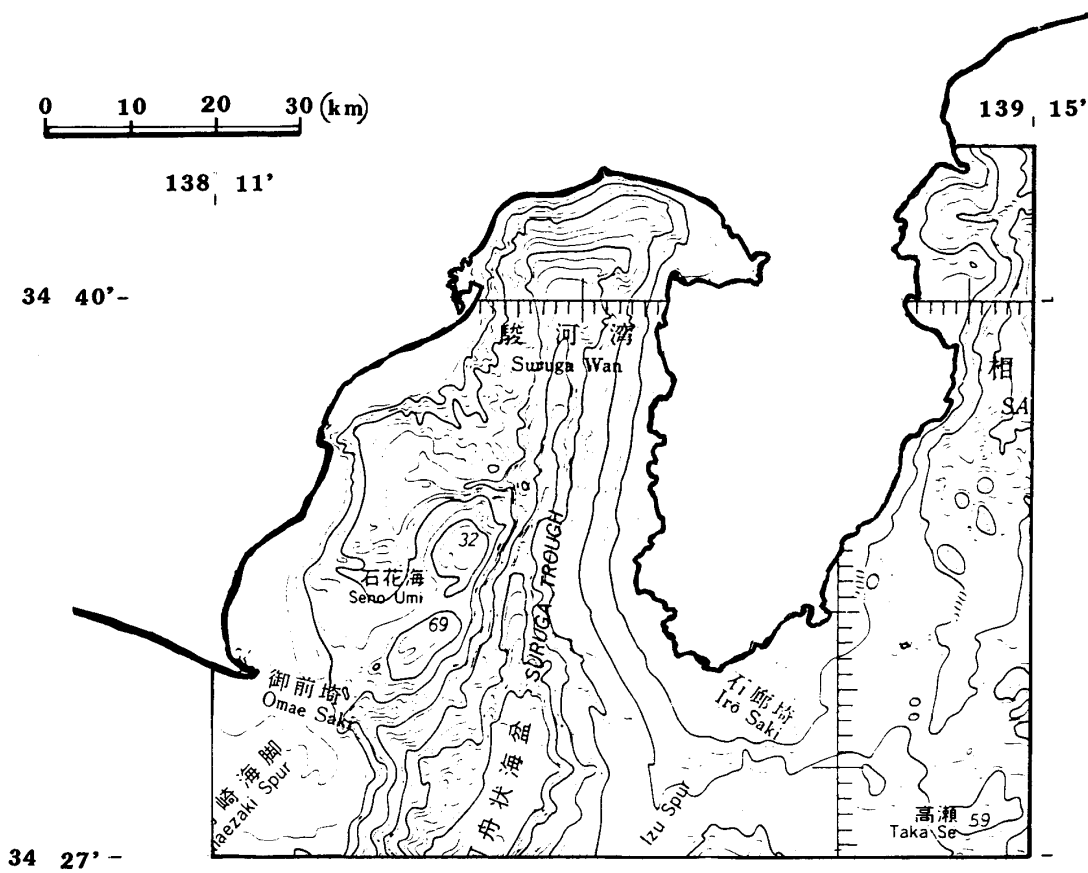


図11 海域地形補正領域 (2).

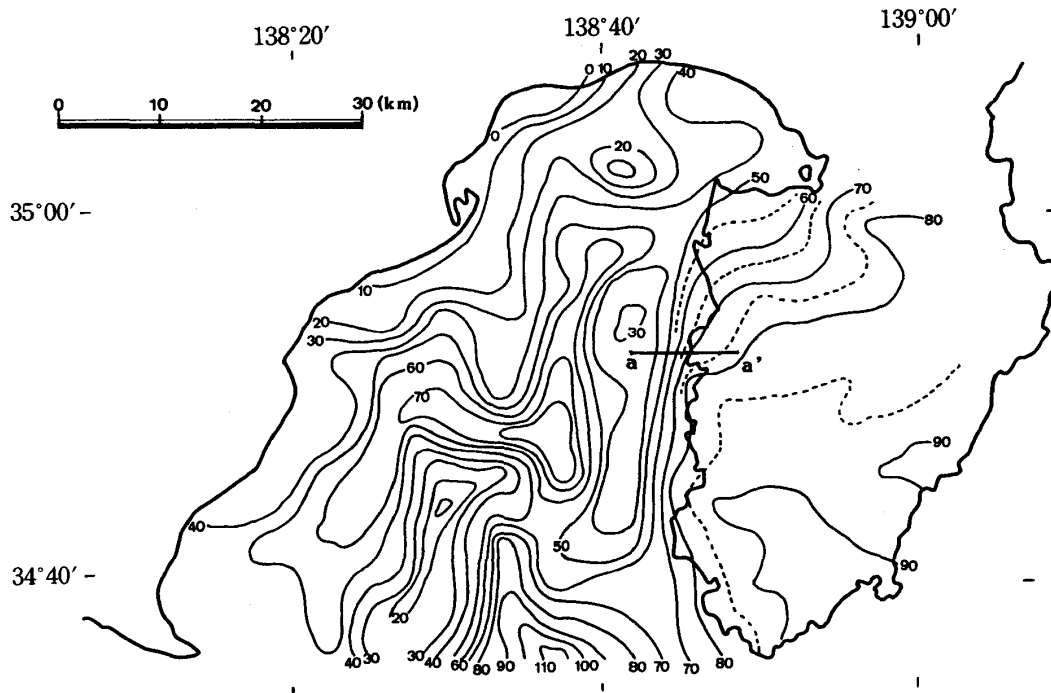


図12 陸上地形のみを考慮したブーゲー異常図(海域は単純ブーゲー異常図). (単位:mgal)

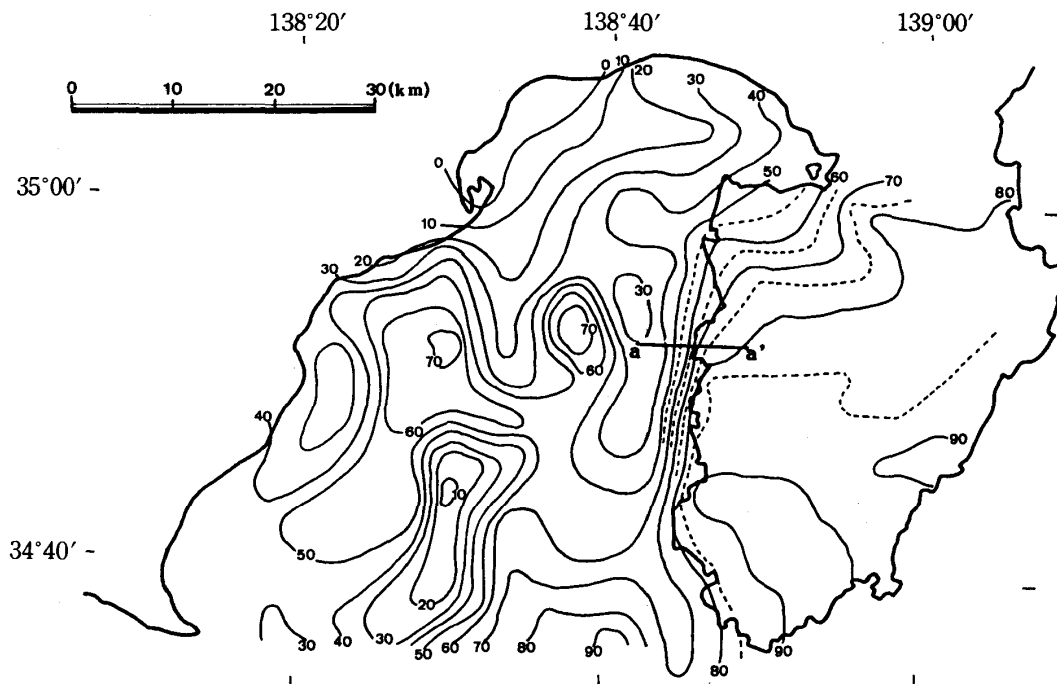


図13 海域地形をも考慮したブーゲー異常図. (単位:mgal)

表1 駿河湾周辺の海域地形補正值(1)〔図4中の☆印〕

No.	Latitude (N)	Longitude (E)	Height (m)	STC (mgal)
1	34° 37.93'	138° 11.08'	4.5	0.4
2	34 41.38	138 12.59	73.0	0.6
3	34 45.79	138 17.11	5.0	0.9
4	34 49.90	138 20.29	3.0	1.7
5	34 50.94	138 19.53	2.3	1.1
6	34 52.88	138 20.40	40.0	1.2
7	34 54.81	138 21.60	6.0	0.8
8	34 56.12	138 20.71	307.0	0.9
9	34 59.34	138 16.54	561.1	0.5
10	35 1.90	138 12.18	450.0	0.3
11	35 4.16	138 8.77	800.0	0.2
12	34 57.65	138 26.13	103.3	1.1
13	34 57.80	138 26.00	59.8	0.9
14	34 59.50	138 26.00	10.0	0.7
15	35 1.00	138 26.00	216.2	0.8
16	35 4.59	138 26.00	700.0	0.9
17	35 7.95	138 26.00	250.0	0.4
18	35 12.80	138 26.00	400.0	0.3
19	35 15.07	138 26.00	990.0	0.3
20	34 58.17	138 29.08	21.0	1.3
21	35 0.72	138 29.58	26.3	1.2
22	35 1.96	138 29.79	3.1	1.1
23	35 4.68	138 32.96	12.5	2.1
24	35 11.51	138 40.00	100.0	0.5
25	35 12.89	138 40.00	300.0	0.4
26	35 15.16	138 40.00	450.0	0.3
27	35 6.28	138 34.26	11.6	1.7
28	35 8.13	138 35.23	572.0	1.9
29	35 8.16	138 42.43	25.9	2.1
30	35 21.44	138 43.83	3775.6	0.6
31	35 6.04	138 50.45	8.2	0.8
32	35 3.37	138 51.88	50.5	0.9
33	35 3.37	138 53.82	392.0	1.0
34	35 0.51	138 55.40	452.0	0.6
35	35 0.82	138 51.65	39.6	0.7
36	35 1.14	138 49.56	162.1	2.5
37	34 59.31	138 46.71	150.0	4.0
38	34 57.12	138 47.90	571.0	3.0
39	34 54.13	138 47.53	2.3	1.3
40	34 48.94	138 45.73	302.8	3.7
41	34 46.12	138 46.34	68.8	2.0
42	34 42.22	138 45.30	518.9	5.3
43	34 38.73	138 46.92	310.8	2.5
44	34 36.03	138 50.74	40.0	0.8

表2 駿河湾周辺の海域地形補正值(2)〔図4中の★印〕

No.	Latitude (N)	Longitude (E)	Height (m)	STC (mgal)
1	34° 36.01'	138° 13.60'	47.2	0.7
2	34 39.02	138 11.46	91.0	0.5
3	34 39.91	138 11.79	5.9	0.5
4	34 41.40	138 10.76	116.6	0.5
5	34 43.43	138 13.53	1.9	0.5
6	34 47.72	138 18.86	7.0	1.1
7	34 52.72	138 20.43	126.0	1.6
8	34 54.13	138 19.20	501.4	1.3
9	34 55.74	138 23.97	5.6	0.9
10	34 57.69	138 27.11	15.0	1.0
11	34 57.77	138 28.27	216.0	1.8
12	34 59.52	138 31.21	20.5	2.2
13	35 1.92	138 31.39	3.9	2.1
14	35 2.76	138 31.31	5.6	1.6
15	35 4.12	138 30.66	399.0	1.9
16	35 6.92	138 36.42	5.9	1.8
17	35 7.01	138 32.20	707.4	1.8
18	35 9.09	138 47.67	151.1	0.8
19	35 7.17	138 39.14	12.0	2.2
20	35 7.97	138 44.70	9.6	2.4
21	35 7.62	138 46.31	10.7	2.3
22	35 6.88	138 48.76	9.6	1.3
23	35 3.59	138 52.95	4.8	0.5
24	35 1.78	138 53.45	137.0	2.1
25	35 0.45	138 47.44	440.0	4.6
26	35 1.03	138 47.25	138.0	3.9
27	34 59.12	138 47.86	521.6	3.3
28	34 57.86	138 46.25	199.0	4.3
29	34 56.00	138 47.00	141.0	2.5
30	34 51.77	138 45.66	149.8	3.7
31	34 43.57	138 45.28	234.0	3.6
32	34 41.20	138 44.79	254.0	5.9

いる。

2. 海上のブーゲー異常(駿河湾)

海域については単純ブーゲー補正と海域地形補正を施したブーゲー異常とを比較することにする。

駿河湾には南北に急斜面の海底谷が走っており、沼津沿岸でさえ水深 1000m 級の谷が存在している。このような海域で行う単純ブーゲー補正は、海底谷の真上において過補正になると予想されるが、実際、図12に示すように単純ブーゲー異常図では、海底谷の形を反映した南北に走る細長いブーゲー異常の尾根がみられる。一方、沿岸部においては単純ブーゲー異常図では過少補正となり、図13に比べて単純ブーゲー異常図を示す図12では、コンターが込み入っている。

なお、単純ブーゲー補正と海域地形補正による

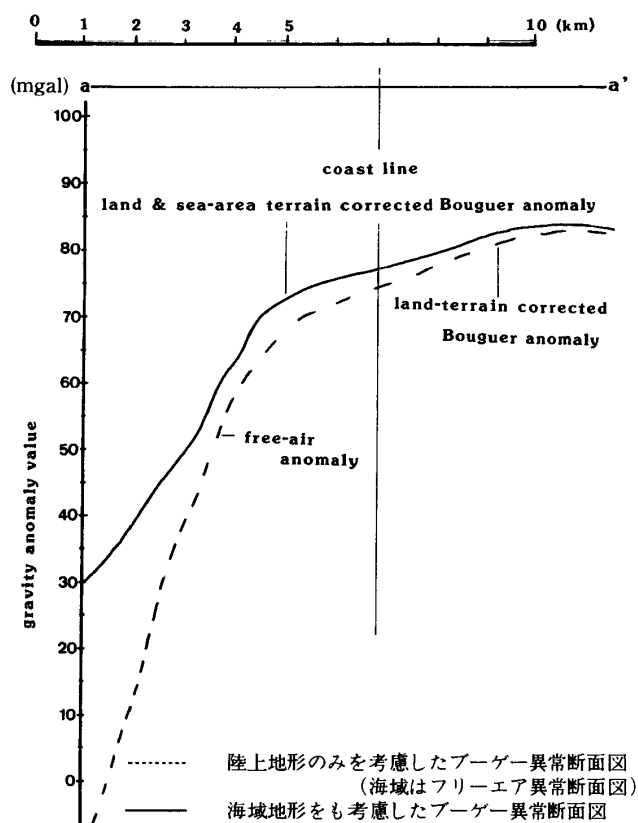


図14 伊豆半島 34°52' N におけるブーゲー異常断面図。

ブーゲー補正との差が最も大きな値を示したのは、図10のNo. 52の地点で、その差は37.5mgalであった。

海域地形補正による駿河湾のブーゲー異常図から地下構造を考察することは重要なことであるが、今回用いた湾内の重力データはフリーエア異常図から読み取ったものであり、精度はあまり良くないと考えられる。より精度の高い駿河湾重力データが得られれば、駿河トラフの地下構造について新しい情報が得られるものと思われる。

VI. 結 論

駿河湾沿岸における重力測定点において、駿河湾を中心とした海域地形補正を実施したところ、伊豆半島には最大約6mgalの補正值を示すところがあり、さらに南方海域についても補正した場合、最大約7mgalほどの影響を受けるところがある。そのため、静岡周辺において地下構造の推定などの重力解析をする場合、少なくとも5mgal以内の精度で検討するのであれば、海域の影響を無視することはできない。

また、駿河湾上のブーゲー異常図について、単純ブーゲー補正值と海域地形補正によるブーゲー補正值とを比べると、最大約40mgalの差を示すところがあり、単純ブーゲー異常による地下構造解析は危険である。

実際の計算では、1mgal以内の精度で海域地形補正を施す場合、メッシュの水深をメッシュの中心の値で代表させるのならば、メッシュの大きさが1メッシュ(1辺が約1km)以内の水深データで行い、また重力測定点近傍については何らかの工夫(例えば重力測定点近傍では1/4メッシュで計算するなど)が必要である。しかし、海域地形補正において、計算プログラムを独自のメッシュの大きさに作成し直す場合は、陸上地形補正の補正領域と重複することによる過補正に注意する必要がある。

海域地形データの読み取りについては、海域地形補正の精度を10%とすると、実際の水深から5%の誤差までは許容されることになる。また、静岡周辺の海域地形補正範囲は、絶対的な値に対して1mgalの精度を要求するのであれば、少なくとも約

70kmは必要である。

VII. 謝 辞

本研究は静岡大学理学部地球科学教室の卒業研究としてなされたものである。

本研究を進めるにあたり、適切かつ有益な御指導を常に賜った静岡大学理学部檀原毅教授、また計算機の使用およびデータの入手も含めて多くの助言を頂いた同教養部里村幹夫助教授に厚く御礼を申し上げますとともに、良き指導者と巡り会えたことを至上の喜びと致すところであります。最後に駿河湾海底地形データ作成の際、御協力頂いた同理学部安間秀明氏に感謝します。

なお 計算は静岡大学データステーション・HIT AC M-150Hを利用した。

文 献

- 河野芳輝・久保昌之(1983),メッシュ状平均標高データを用いた地形補正計算. 測地学会誌, 29, 101-112.
野崎京三(1981),球面地形補正の計算プログラム. 測地学会誌, 27, 23-32.
友田好文(1972),伊豆小笠原諸島北部の重力フリーエア異常. 「伊豆半島」(東海大学出版会), 301-303.