

重力から見た昭和基地周辺の地形の特徴 —特に大陸氷床下の基盤地形について—

長 尾 年 恭*

Topographic Features around Syowa Station as Viewed from the Gravity Measurements —Some Implications on the Bedrock Topography under the Ice Sheet—

Toshiyasu NAGAO*

Abstract: The coefficients of the correlation between the reduced gravity anomaly and the bedrock height were calculated using gravity data in the Lützow-Holm Bay region and the Mizuho Plateau, East Antarctica. A good positive relationship between the bedrock height and the reduced gravity anomaly was found on the sea ice and in the ice-free area of Lützow-Holm Bay and in the ice-free area of the Yamato Mountains. On the contrary, the correlation between the reduced gravity anomaly and the bedrock height at gravity stations on the ice sheet whose ice thickness was measured by an ice radar survey showed a weak negative relationship. This fact may suggest that the determination of ice thickness by an ice radar on the ice sheet was inaccurate. The negative relationship between the reduced gravity anomaly and the bedrock height in the Mizuho Plateau means that the isostasy of this area is incomplete.

要旨: 第22次観測隊で行われた昭和基地周辺の重力測定結果から reduced gravity anomaly を求め、基盤岩地形との相関係数を計算して、重力から見た基盤岩地形および上部地殻構造の特徴の比較を試みた。比較した地域は、リュツォ・ホルム湾内の露岩地域、海氷上、やまと山脈地域内の露岩地域、そしてアイスレーダーで氷厚の示されている昭和基地-みずほ基地ルートの一部地域である。結果は露岩地域、海氷上では、いずれも予想されるとおり、地形との正の相関が示された。しかし、昭和基地-みずほ基地ルートでは、データのばらつきが大きく、しかも負の相関を示した。このことは、アイスレーダーで示された基盤岩地形を重力測定結果から解釈すると、モホ面が水平でなく、かつ凸凹していることに相当する。しかし、他の地域ではそのようなことはなく、これはアイスレーダーの反射記録の解釈に原因があるのかもしれない。

1. 緒 言

昭和基地およびその周辺地域では、観測船「宗谷」の時代から、これまで数多くの重力測定が行われてきた（たとえば HARADA *et al.*, 1963; YOSHIDA and YOSHIMURA, 1972; ABE, 1975; 神沼ら, 1980 など）。しかし、大陸氷床上の重力測定点では、氷厚が未知の点も多い

* 東京大学地震研究所. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1, Yayoi 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

ので、このような点では、フリーエア異常は求められてもブーゲー異常を計算することができなかった。

日本南極地域観測隊は、これまで人工地震法やアイスレーダー法を用い、みずほ高原を中心に、氷厚、すなわち基盤地形を知る努力を精力的に実施してきた（たとえば NARUSE and YOKOYAMA, 1975）。特にアイスレーダー法は、氷厚を連続的に知ることができるので、大変有力な方法である。しかし、アイスレーダー観測では、基盤岩からの反射波のほかに、氷床内部での多重反射によるノイズのため、真の基盤岩からの反射を取り違える可能性があり、その結果の解釈および使用には注意が必要である（MAE, 1978）。たとえば、昭和基地-みずほ基地間でも、氷厚の示されていない点があるが、これはどの反射記録が真の基盤岩表面からのものか決定不能だったためである。

ここでは、1981年に第22次観測隊が、昭和基地周辺で実施した重力測定の結果（KAMINUMA and NAGAO, 1984）を用い、リュツォ・ホルム湾内の海氷上および露岩地域、やまと山脈地域の露岩地域で reduced gravity anomaly と基盤地形の相関係数を計算した。次に、昭和基地-みずほ基地ルートで、アイスレーダーにより決定された基盤地形と reduced gravity anomaly が、どのような相関係数を持つか比較し、他の露岩地域との違いを述べる。さらに、今後の観測指針について、この研究ノートの結果も含め、若干の提案を付け加えてみたい。

2. 方法・原理

今回は基盤地形の特徴を比較するため、解析にはフリーエア異常から求める reduced gravity anomaly (KAMINUMA and MIZOUE, 1978) を用いた。Reduced gravity anomaly は式 (1) で表される。

$$\Delta g_h = \Delta g_0 - 2\pi G \rho (H - h) \dots \dots \dots (1)$$

ここで Δg_0 (mgal): フリーエア異常, H (m): 測定点の標高, h (m): reduced gravity anomaly を求める標高, ρ (g/cm³): 氷の密度, G (cm³/g·s²): 重力定数である。

Reduced gravity anomaly は南極で氷床の厚さがわかっていない地域の多いことから提唱されたもので、ある一定の高さ h まで氷で埋めつくされているものと仮定し、その高さ h にすべての重力値を補正する。つまり、標高 h の氷床面でのフリーエア異常に相当する。なお、海氷上の測定では、測定点の高さはすべて近似的に海拔 0 m と考えられ、reduced gravity anomaly を与える式 (1) の右辺の第 2 項は定数となる。このため、フリーエア異常を用いて話を進める。

もし、モホ面が水平で、それ以下の地下構造を一樣と仮定すれば、reduced gravity anomaly の差は、原理的に基盤岩表面地形（露岩上であればそのまま標高、海氷上では水深）の差によって生じることになる。ここでは、 $h=4000$ (m) として reduced gravity anomaly を計

算し、露岩地域では標高と、海水上では水深と、ルート上ではアイスレーダーによる氷厚データとから計算した基盤岩表面の高度との相関係数を計算した。

3. データ解析

3.1. 解析結果

図1に今回の測定点全体の位置関係を示した。左上の点線で囲った地域が、昭和基地周辺の露岩地域および海水上での測定が行われた地域で、左下の点線内の地域がやまと山脈地域である。みずほ高原のルート上の大小の黒丸は昭和基地-みずほ基地-やまと山脈にいたる KAMINUMA and NAGAO (1984) の測定点で、大きな黒丸は NARUSE and YOKOYAMA (1975) によるアイスレーダー観測で氷厚も示されている点である。

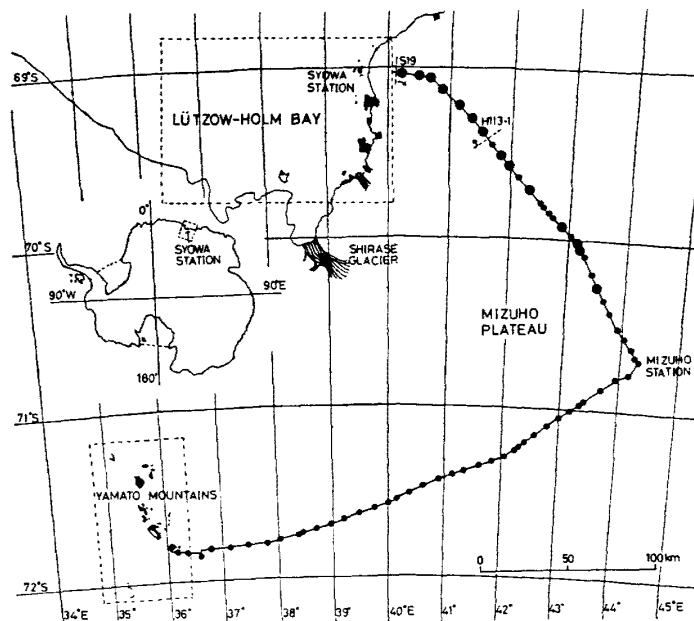


図1 重力測定地域。左上の点線で囲ったリュツォ・ホルム湾地域では露岩上と海水上で測定を実施した。また、左下に点線で囲ったやまと山脈地域では露岩上の測定点のみを議論の対象とした。みずほ高原では昭和基地-みずほ基地間の測定点のうち大きな黒丸で示したアイスレーダーで氷厚が既知の点のみを議論した

Fig. 1. The area of the gravity measurements. Station locations in the Lützow-Holm Bay and Yamato Mountains regions are given in Figs. 2 and 3. Solid circles on the route are the gravity measurements points by KAMINUMA and NAGAO (1984). Large solid circles are the stations where the ice thickness is known.

図2にリュツォ・ホルム湾内の露岩地域(右側に示した4つの点線で囲った地域)と海水上の測定点の位置を示した。37°Eと37°30'Eの間に引いた矢印を伴った点線は、リュツォ・ホルム湾海水上の測定で、データを東西2つの地域に分けて解析した境界を示している。

図3にやまと山脈地域内の露岩上の測定点を示した。測定点の名前は KAMINUMA and NAGAO (1984) に準じている。

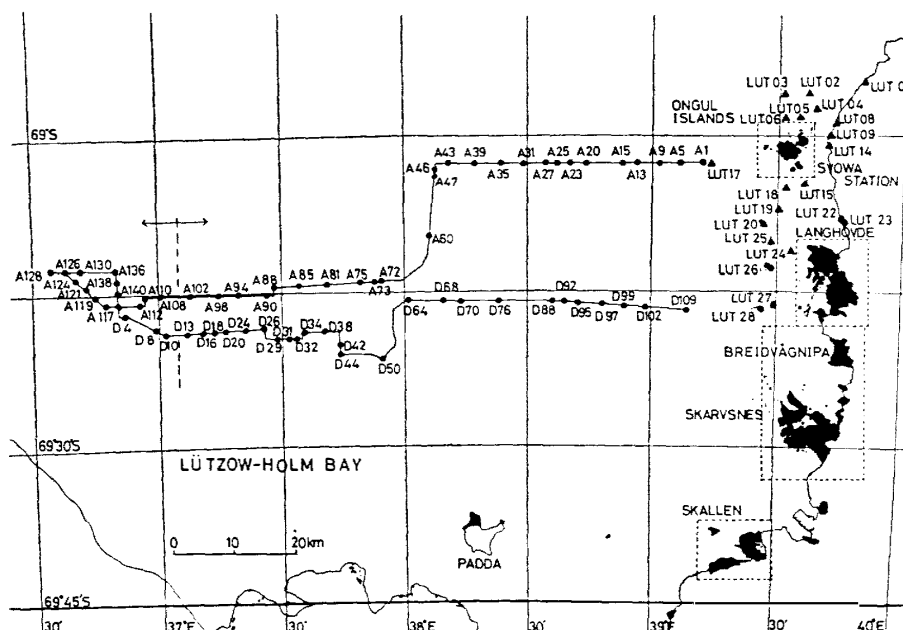


図 2 リュツォ・ホルム湾沿岸の露岩地区および氷海上の測定点. 図中の 37°E と $37^{\circ}30'\text{E}$ の間に示した点線は、氷海上の測定のうちデータを東西にわけて解析した境界を示す. 右側の点線で囲まれた4つの地域は露岩地帯を示している. 測定点の名前は KAMINUMA and NAGAO (1984) に準じた

Fig. 2. Gravity measurement points on the sea ice and in the ice-free area of the Lützow-Holm Bay region. Ice-free areas at the edge of the continent are shown as enclosed with dotted line. The dotted line with two arrows on the sea ice is the boundary of the analysis of the sea ice measurements. The name of gravity station is referred to KAMINUMA and NAGAO (1984).

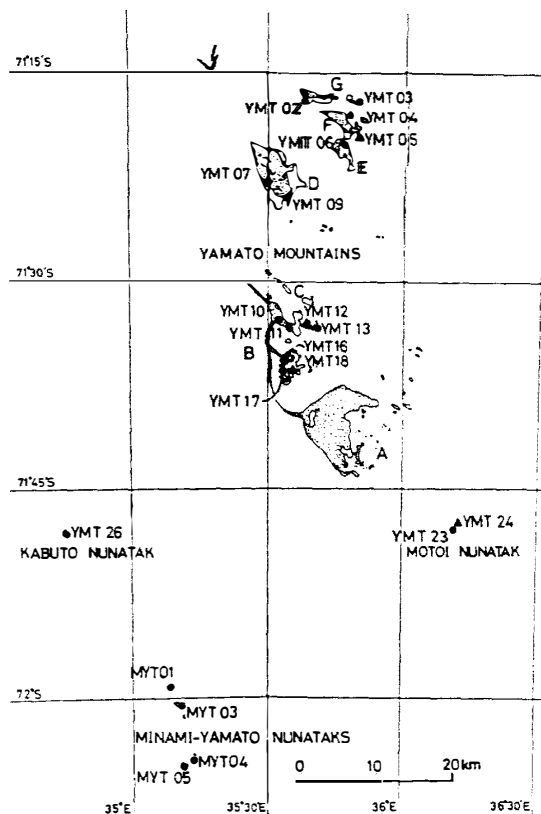


図 3 やまと山脈地域での露岩上の測定点の分布. 測定点の名前は KAMINUMA and NAGAO (1984) に準じている

Fig. 3. The gravity measurement points of the Yamato Mountains. The name of gravity station is referred also to KAMINUMA and NAGAO (1984).

3.2. 露岩地域の測定点の相関

図4に露岩地域の全測定点についての reduced gravity anomaly と標高の関係を示した。ここでは両者の相関係数は $r=0.307$ となり、あまり相関のよい記録といえない。また、図中に書かれた直線は、最小二乗法を用いて求めたもので、以下の図も同様である。これは、露岩上の測定点では重力計を人間が持ち運んで測定を実施するため、測定点が海岸近くの低地に多く集中したためである。標高 50 m 未満の測定点が全体の 86% を占めており、横軸

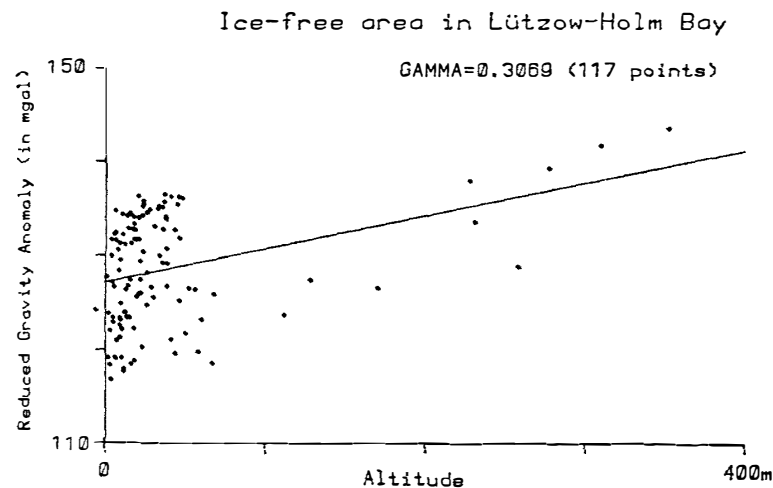


図4 リュツォ・ホルム湾沿岸露岩地域全体の測定点の reduced gravity anomaly (reduced height=4000 m) と標高の相関。図中に示した直線は最小二乗法により求めたもの

Fig. 4. The correlation between the reduced gravity anomaly (reduced height=4000 m) and the altitude in the ice-free areas of Lützow-Holm Bay. GAMMA is a coefficient of correlation. Solid line is calculated by the method of least squares.

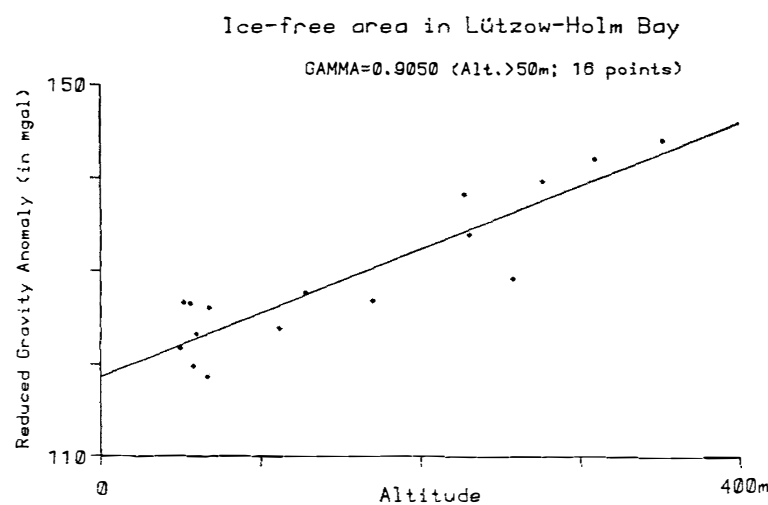


図5 図4で示した測定点のうち標高が 50 m 以上の点 16 点の reduced gravity anomaly との相関

Fig. 5. The correlation between the reduced gravity anomaly and the ice-free area of which altitude is over 50 m.

方向に偏った分布となっている。このため、標高が 50 m 以上の 16 測点と reduced gravity anomaly の相関を示したのが図 5 である。標高が 50 m 以上の測定点は、実際にはラングホブデ地域、スカルブスネス地域、スカーレン地域のみに分布し、図 2 からわかるように、約 30×50 km の地域の特徴を示すことになる。その結果は $r=0.905$ となりよい相関を示した。これは、露岩上の測定点では標高の精度がよく、フリーエア異常も少なくとも 0.5 mgal の精度で得られており (KAMINUMA and NAGAO, 1984), モホ面が上記の 3 地域ではほぼ水平に一樣な構造であることを示している。

3.3. 海氷上での測定

図 6 に海氷上の全測定点のフリーエア異常と水深の関係を示す。ここでは水深の正の方向

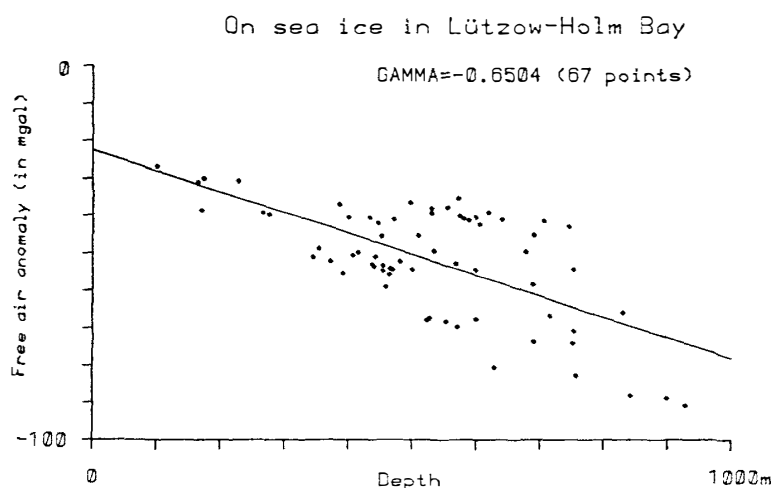


図 6 図 2 で示したリュツォ・ホルム湾の海氷上の全測定点のフリーエア異常と水深との相関

Fig. 6. The correlation between the free air anomaly and the water depth of sea ice measurements in Lützow-Holm Bay.

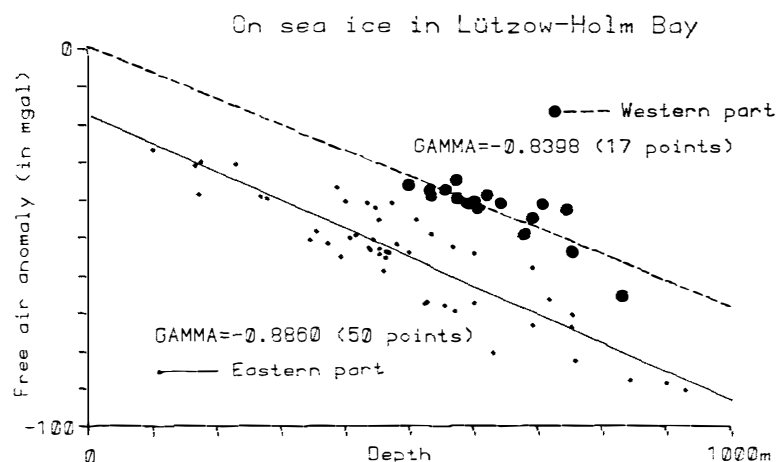


図 7 図 2 に点線で示した境界で、海氷上の測定点のフリーエア異常と水深との相関係数を東西に分けて計算した

Fig. 7. The correlation between the free air anomaly and the water depth of sea ice measurements in the eastern and western parts of Lützow-Holm Bay.

を座標軸のプラスとしたため、相関係数は負になっている。全測定点ではおよそ $100 \times 50 \text{ km}$ の広がりとなり、相関係数は -0.650 という値を示した。このなかで、図 2 に点線で示した所で地域を東西にわけて解析すると、東側 50 点の相関係数は -0.886 、西側 17 点のそれは -0.840 といずれも高い値となった (図 7)。この境界は、図 6 の測定結果の分布から、南北方向の境界の位置を変化させて、東側と西側の相関係数の和がもっとも大きくなる場所を選択した (たとえば、A94 と A98, D24 と D20 の間を境界とすると、東側 44 点の相関係数は -0.926 とさらにより値を示すが、西側 23 点のそれは -0.599 になってしまう)。これは、

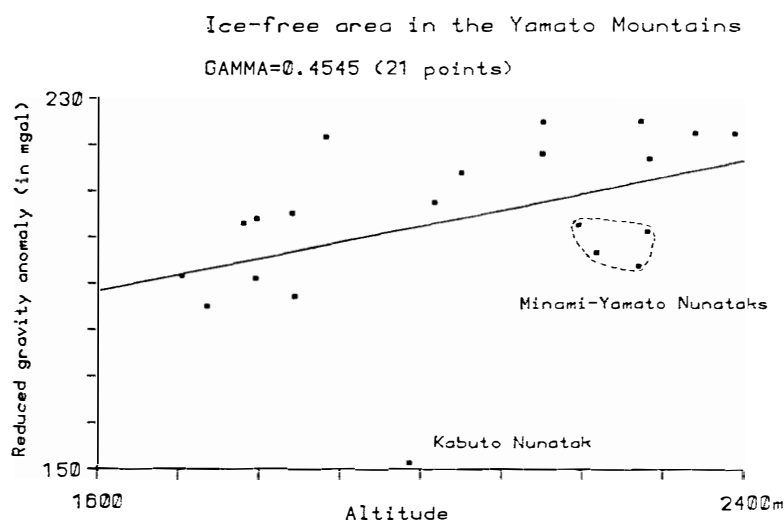


図 8 図 3 で示したやまと山脈地域の露岩上の全測定点の reduced gravity anomaly と標高との相関
Fig. 8. The correlation between the reduced gravity anomaly and the altitude in the ice-free area of the Yamato Mountains.

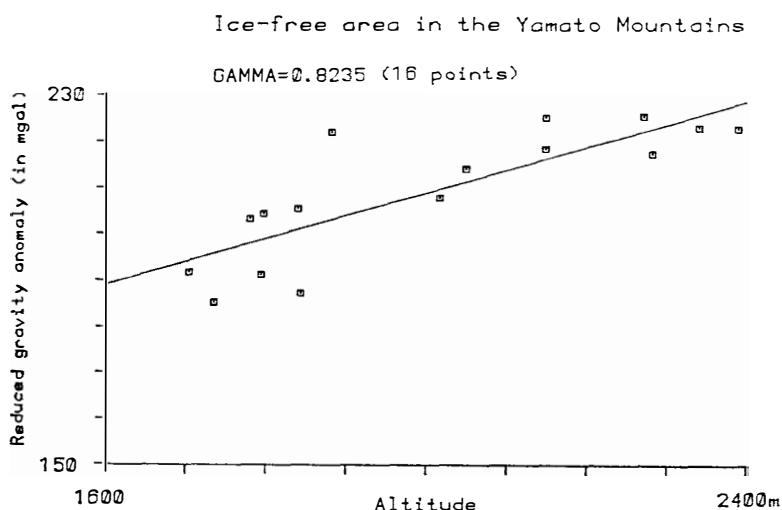


図 9 図 8 から南やまとヌナタック群とかぶと岳を除き reduced gravity anomaly と相関をとったもの
Fig. 9. The correlation between the reduced gravity anomaly and the altitude in the ice-free area of the Yamato Mountains except the Minami Yamato Nunataks and the Kabuto Nunatak.

リュツォ・ホルム湾内の地下構造が、東と西で違う可能性を示唆しているのではないかと推定される。

3.4. やまと山脈地域での測定

図8にやまと山脈地域の露岩上の全測定点(約 40×80 km の範囲)についての reduced gravity anomaly と標高の関係を示す。両者の間の相関係数は 0.455 となった。南やまとヌナターク群とかぶと岳が、やまと山脈 A-G 群と離れた所にプロットされる。別の事実として、やまと山脈 A-G 群と南やまとヌナターク群の間には点々と巨大な氷丘が連なっている。この氷丘は、基盤地形を反映していると推定されているが、あるいは両地域の間地下構造の違いにまで原因を求めることができるかも知れない。南やまとヌナターク群とかぶと岳を除くと、相関係数は 0.824 となり、やまと山脈 A-G 群 (30×60 km の範囲) では標高と reduced gravity anomaly の間に正の相関が成り立っている(図9)。

3.5. 昭和基地-みずほ基地ルート上での測定

図10に昭和基地-みずほ基地ルートにおいて NARUSE and YOKOYAMA (1975) の氷厚の測定結果のある14点の reduced gravity anomaly と、その氷厚測定結果から計算された基盤岩表面の高さ(海拔高度)との相関を計算した。ここでは、データのばらつきが大きく、相関係数も -0.208 と負の値を示した。測定点の分布は、ルート上の約 200 km の範囲であるが、これはリュツォ・ホルム湾内の露岩上や海水上の測定、やまと山脈地域での測定と比べると、一辺の距離が2-5倍も長い。また、これだけの長さの測線で、モホ面が水平であるという仮

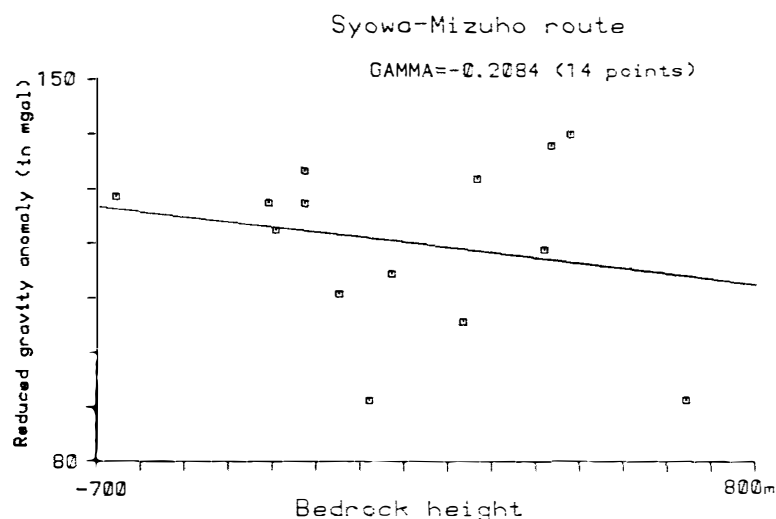


図10 昭和基地-みずほ基地ルートにおいて KAMINUMA and NAGAO (1984) の測定点で、かつアイスレーダーにより氷厚が示されている点14点の reduced gravity anomaly と基盤岩高度との相関

Fig. 10. The correlation between the reduced gravity anomaly and the bedrock height calculated from the result of the ice radar observation along the Syowa Station-Mizuho Station oversnow traverse route.

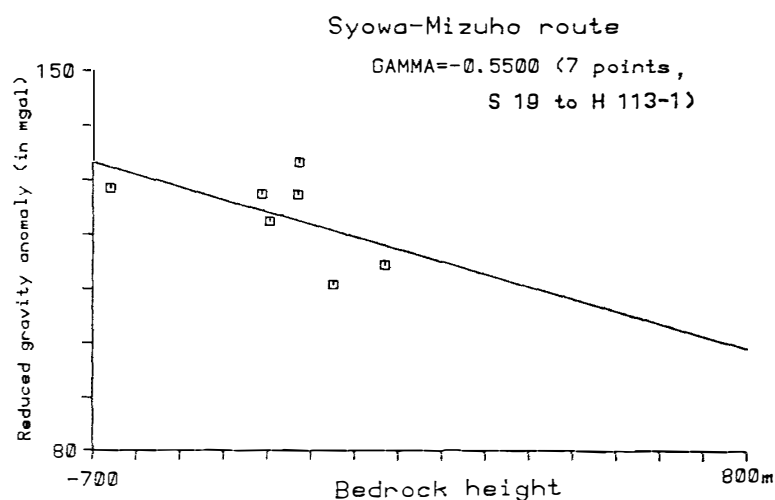


図 11 図 10 で示した昭和基地-みずほ基地ルートのうち、昭和基地寄りの 7 点のみの相関

Fig. 11. The correlation between the reduced gravity anomaly and the bedrock height of seven gravity stations near Syowa Station. These stations are shown in Fig. 1 with large solid circles.

定が成り立っている保証もない。それゆえ、相関が小さいから、あるいは負だからといって、アイスレーダーによる氷厚測定に問題があると一概に言うことはできない。そこで、氷厚測定結果が連続的に示されている図 1 のルート上に、点線と矢印で示した昭和基地寄りの 7 点 (S19-H113-1) で同じく相関をとってみた (図 11)。ここでは測定の一辺は約 80 km となり、海水上の測定と同程度の広がりとなる。測定点数は少ないものの、相関係数はさらに大きな負の値 (-0.550) を示した。これは図 4, 5, 8, 9 の基盤地形と reduced gravity anomaly は正の相関をなすという結果とまったく相いれないものである。

4. 結 論

以上のように、リュツォ・ホルム湾内の海水上や露岩地域、さらにやまと山脈地域でも、標高と reduced gravity anomaly は正の相関を示した (海水上では水深と比較したため相関は負になっている)。しかし、昭和基地-みずほ基地ルートでは、負の相関係数を示し、かつデータのばらつきも大きい。アイスレーダーの測定結果から、昭和基地-みずほ基地ルートでの重力の測定結果を解釈するには、モホの形が他の露岩地域と異なり、凸凹しているという結果になる。みずほ高原での重力測定の精度に関して KAMINUMA and NAGAO (1984) は 0.5 mgal という値を示しており、大陸氷床上での測定の精度は今回の解析に十分たえられる。このことから一つの可能性として、図 10 あるいは図 11 のデータのばらつきの原因は、アイスレーダーによる氷厚測定の不確かさに起因すると考えられる。

次に今回の解析結果を単純に解釈してみる。Reduced gravity anomaly と基盤岩表面高度の相関係数が負というのは、大陸氷床上の質量欠損を意味し、定性的には、かつてみずほル

ートでは今よりも厚い氷床が存在し、地殻がまだアイソスタシーを回復していないとすれば説明できる。この場合、基盤岩地形の不確定さは上記の議論に大きな影響を及ぼす。氷と基盤岩の密度差が、基盤岩とマントルを構成する岩石のそれの約3倍（氷=0.9, 基盤岩=2.67, マントル=3.3 とすると、その差は 1.77 と 0.63 g/cm³）となるためである。アイスレーダーの結果をより有効に活用するためにも、重力測定を同時に実施することが大切である。

現在、昭和基地周辺では、重力、航空磁気、人工地震など各種の固体地球物理学データが集まりつつある。そして、リュッォ・ホルム湾の海底地形も明らかになりつつある。しかし、南極を考えるうえで、大陸氷床およびその下に横たわる大陸基盤をぬきに考えることはできない。そして、基盤岩地形のデータは、もっとも大切なものの一つである。現在、みずほ高原での氷厚測定は、第23次観測隊より再開され、昭和基地-みずほ基地ルートでも再測がおこなわれた。そして氷厚も現在では40 m 程度以下の誤差で決定できるとの報告もある（西尾, 私信）。この40 m という値は重力に換算すると、ブーゲー異常で約3 mgal の誤差に相当する。この程度の誤差の範囲で昭和基地-みずほ基地ルート上でブーゲー異常が求められれば、みずほ高原で現在どの程度アイソスタシーが成りたっているか計算することができる。さらに、これに地殻熱流量と地殻変動（たとえばオングル島の現在の隆起速度など）のデータが加われば、地下の熱的状态や隆起速度からマントルの剛性率も計算でき、プレートテクトニクスにおける南極大陸の運動に対する解答も、近い将来与えることができると考えられる。

謝 辞

この研究ノートを書くにあたり、国立極地研究所の神沼克伊教授、東京大学海洋研究所の瀬川爾郎助教授のお二人には、有益なご助言をいただき、また原稿の査読をしていただいた。ここに感謝いたします。

文 献

- ABE, Y. (1975): Gravity data. JARE Data Rep., 28 (Glaciol.) 114-119.
HARADA, Y., KAKINUMA, S. and MURATA, I. (1963): Pendulum determination of the gravity differences between Tokyo, Mowbray and Syowa Base. Nankyoku Shiryô (Antact. Rec.), 17, 35-50.
KAMINUMA, K. and MIZOUE, M. (1978): Modes of gravity anomaly distributions in relation to the crustal structure of the Antarctic Continent. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), 61, 32-39.
KAMINUMA, K. and NAGAO, T. (1984): Gravity survey in Lützow-Holm Bay and the Mizuho Plateau, East Antarctica, 1981. JARE Data Rep., 89 (Earth Sci. 1), 59-87.
神沼克伊・国見利夫・大滝 茂 (1980): 南極・竜宮岬と昭和基地付近での重力観測。南極資料, 70, 149-157.
MAE, S. (1978): The bedrock topography deduced from multiple radar echoes observed in the Mizuho Plateau, East Antarctica. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), 61, 23-31.
NARUSE, R. and YOKOYAMA, K. (1975): Position, elevation and ice thickness of stations. JARE Data Rep., 28 (Glaciol.), 7-47.
YOSHIDA, M. and YOSHIMURA, A. (1972): Gravimetric survey in the Mizuho Plateau-West Enderby Land area, East Antarctica, 1969-1971. JARE Data Rep., 17 (Glaciol.), 168-203.

(1984年4月28日受理)