

1992年に実施した東南極ドームF周辺部の重力測定

神山孝吉¹・金尾政紀^{2*}・前野英生³・古川晶雄^{4*}

Gravity Survey on the Mizuho Plateau, East Antarctica
along the Traverse Routes to Dome-F from Syowa Station

Kokichi KAMIYAMA¹, Masaki KANAO^{2*}, Hideo MAENO³
and Teruo FURUKAWA^{4*}

Abstract: Several kinds of geophysical and glaciological surveys were carried out on the Mizuho Plateau from Syowa Station (69.0°S, 39.6°E) to Dome-F (77.4°S, 39.6°E) in 1992 by the inland traverse team of the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-33). The gravity measurements were conducted by LaCoste-Romberg gravity meter (G-515) at about 10 km-intervals along the traverse routes. The start-and-end measurement point were the absolute gravity point (IAGBN) at Syowa Station. Along the upward route to Dome-F, the measurements were often interrupted by instrument fluctuation induced by the strong wind. The instrument was cooled down (possible occurrence of the tears) at least twice when the oversnow vehicle did not move and the electric supply was stopped.

The gravity values along the traverse routes were determined considering the correction of drift rates and some tears. The gravity anomalies were calculated by making use of the data both of surface elevation from GPS positioning with some modification by atmospheric pressure and of the ice thickness from the radio-echo soundings.

The obtained free-air gravity anomaly profiles correlate well with those of bedrock elevation. The continuous data of bedrock elevation beneath the Dome-F area, obtained by radio-echo soundings, revealed the basin-like topographic structure of the glacier beds surrounded by bedrocks at comparatively higher altitude, which is supported by free-air anomaly data.

要旨: 第33次南極地域観測隊 (JARE-33) により、南極氷床内陸域への掘削地点選定旅行が実施された。本旅行は「南極氷床ドーム深層掘削観測計画」の一環として行われたものである。旅行期間中には各種の地球物理学的観測が行われたが、特に掘削地点選定の一環としてアイスレーダを利用した基盤地形の連続探査を実施した。同時にラコスト重力計 (G-515) による重力測定をルート上で適宜行ったので、ここに報告する。

1992年9月21日から12月29日にかけて、昭和基地重力計室内の絶対重力基準点 (69.0°S, 39.6°E: $g=982524.244$ mgal) を起点としてドーム頂上 (77.4°S,

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Gokashyo, Uji 611.

³ 通信総合研究所. Communications Research Laboratory, 2-1, Nukui-Kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

⁴ 名古屋大学大気水圏科学研究所. Institute for Hydrospheric and Atmospheric Sciences, Nagoya University, Furou-cho, Nagoya 464-01.

* Present address: 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

39.6°E) とを往復測定した。雪上車の振動や保温対策に細心の注意を払ったにもかかわらず、少なくとも2カ所でテアの発生が確認された。これは内陸域での延べ100日に及ぶ長期旅行期間中に、重力計のバッテリーへの電源供給を絶つことを余儀なくされたためである。したがってテアの補正と地球潮汐、ドリフト補正を行った後に重力異常を計算した。

計算されたフリーエア異常に含まれる誤差は6 mgal程度と思われ、測定高度誤差(10 m)とジオイド高一定の仮定の不確かさ(10 m)が反映している。また、ブーゲ異常に含まれる誤差は13 mgal程度と思われ、氷厚測定誤差(100 m)によるブーゲ補正誤差と上記のフリーエア補正の誤差が反映している。

旅行ルート上でのアイスレーダから求められた基盤地形高度の極大値と、計算された重力異常の極大値、特にフリーエア異常の極大値が良い対応を示した。ドーム周辺域では数10 kmの領域で比較的密に観測を実施したが、基盤地形高度とフリーエア異常の相関が良いことが確認された。ドーム頂上周辺部では基盤地形高度が増大し中央部が盆地状に低下していることがアイスレーダによる連続観測から示されたが、フリーエア異常のデータもこの結果を支持している。

1. はじめに

第33次南極地域観測隊(JARE-33)は、1992年9月22日より12月24日にかけて、「南極氷床ドーム深層掘削観測計画」の一環として昭和基地南方約900 kmにある氷床ドーム(Dome-F)頂上までの、燃料・物資輸送を兼ねた掘削地点選定旅行を実施した。将来の継続的観測地点となるいくつかの基本観測点をトラバースルート上に新たに建設すると共に、気象観測や雪氷観測、アイスレーダ、GPS測量をはじめとする各種観測を旅行期間中に実施した。数年後に計画されているドーム内陸域での深層掘削に向けて、ドーム周辺部の氷床基盤地形を明らかにすることが本旅行の大きな目的の一つであった。アイスレーダによる連続的な氷厚探査とGPS・気圧高度計による標高測定に加えて、ラコスト重力計1台による重力測定を適宜実施した。

ドーム内陸域における重力測定が実施されたのは、第9次観測隊による南極点旅行の際が最初である(YANAI and KAMINUMA, 1971)。現在アイスレーダ・システムの能力が向上したため、氷厚推定値・ブーゲ異常値の測定精度は大きく向上している。また、近年雪氷学的研究の立場からみずほ高原内陸部における調査が精力的に行われアイスレーダとJMR・気圧高度計によって基盤地形データが得られ、同時に重力データも蓄積されている(NISHIO *et al.*, 1988)。特に第26次観測隊においては、今回とは別の調査ルートでドーム域までの重力測定を行っている(AGETA *et al.*, 1987)。こうしたみずほ高原における重力測定データの一部は、NAGAO and KAMINUMA (1988)のデータレポートにより再編集とコンパイルがなされた。また、最近ではこれらコンパイルされた重力データを用いてみずほ高原の重力異常の三次元表示が行われている(長尾ら, 1991)。

今回第33次観測隊の内陸旅行で、アイスレーダとGPS・気圧高度計を利用して連続した基盤地形データを旅行ルート上沿岸部から内陸部まで得ることができた。したがって重力データとして、フリーエア異常に加えてブーゲ異常を内陸部まで計算した。また氷床ドーム

頂上付近では深層掘削地点選定のため別途調査ルートを設定し、アイスレーダ・重力測定とも面的な探査を行った。

なお今回の重力データについては、KAMIYAMA *et al.* (1994) に雪氷、気象データと共に旅行中の観測の一環として記載されている。したがって本論文では重力測定値の概要を整理し簡単な解析を加えた。本報告が新たな観測を計画・立案する際の一助となれば幸いである。

2. 重力測定

表 1 には測定の概要を示した。使用したラコスト重力計は G-515 型で、選点旅行中以外の越冬期間（1992 年 2 月–9 月）には昭和基地で地球潮汐の連続観測を行っていたものである。旅行期間中の測定回数は合計 84 回であるが、往復で重複して測定した地点がいくつかあり測定点数は合計 78 地点である。ルート積算距離を考慮すると結果的には約 10 km 間隔での測定となった。重力測定には車両の停車も含めて 1 測定 15 分程度必要とした。旅行行動中には重力測定のほかにも多くの観測計画が盛り込まれており、旅行の行動計画や他の諸観測との整合性を考慮し、往路・復路とも 10 km 間隔の測定を立案し実行に努めた。しかしながら、悪天候中には車外での観測がむずかしいこと、強風による重力計の振動などのため、特に往路では重力測定を実施できた機会はまれである。

従来地学棟内の基準点 ($g=982523.750$ mgal, 神沼ら, 1984) を、昭和基地の重力基準点として用いてきたが、第 33 次観測隊夏期間に重力計室内の IAGBN 基準点 ($g=982524.244$ mgal, 藤原ら, 1992) での絶対重力測定がなされた。このため、今回はこの重力計室内基準点をルート往復の帰着点として測定を行った。図 1 に選点旅行隊の調査ルートと基本観測点とを示した。氷床掘削を行うドーム頂上域は、昭和基地の南方約 900 km に位置しており、ルートのはほぼ主流線沿いとなっている。ルート上に沿って雪上車の走行距離から求めたところ、S16 地点と DF80 地点とはちょうど 1000 km の距離にある。図 2 には、氷床ドーム頂上付近における深層掘削地点の調査ルートを示す。第 26 次観測隊が 1985 年に設置した DF80 地点を起点にして、各主要地点を矢印（白抜き数字）の順に結

表 1 重力測定の概要
Table 1. Summary of the JARE-33 gravity survey.

Observer	Kokichi KAMIYAMA
Gravity meter	LaCoste-Romberg G-515
Number of measurements	84 times
Number of stations	78 points
Date	Sep. 21, '92–Dec. 29, '92
Drift of gravity meter	−0.076 mgal/day (=−3.17 μ gal/hour)
Tear corrections	−7.107 mgal (Nov. 2–3, '92), −21.357 mgal (Nov. 8–16, '92)

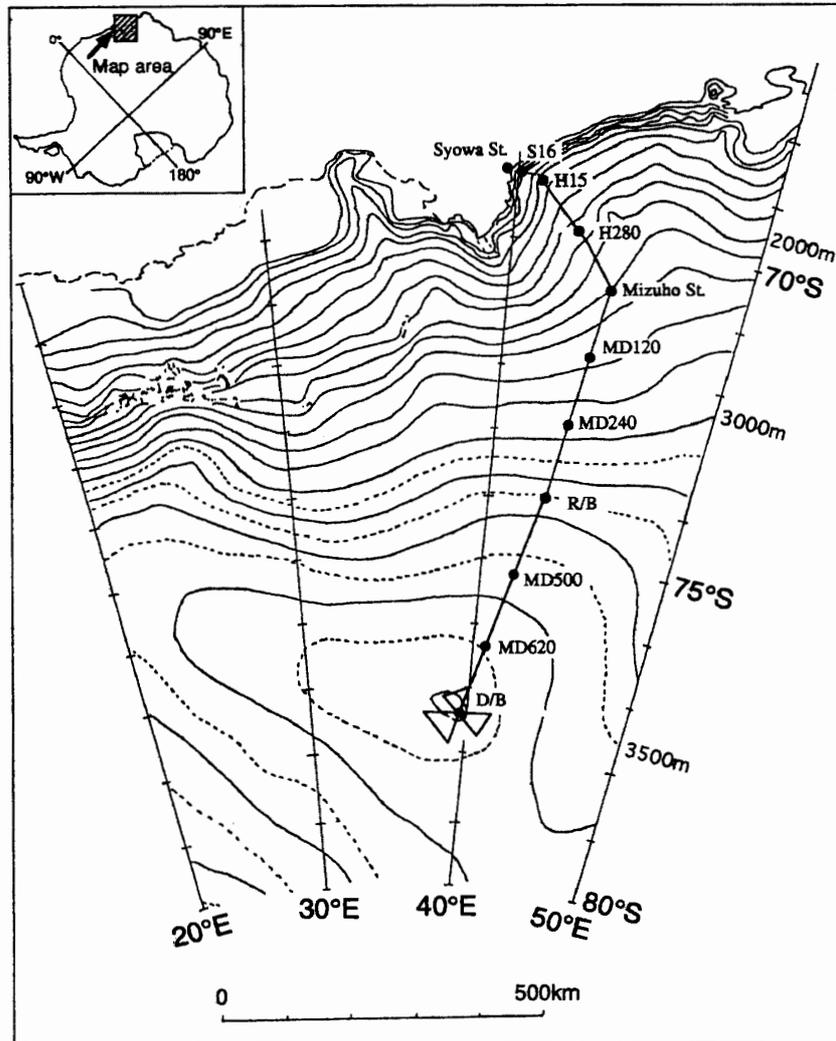


図1 33次ドーム旅行における調査ルートと基本観測点

Fig. 1. Map showing the traverse routes carried out by JARE-33. Each closed circle shows the location of the main observation point. R/B indicates the Relay Base and D/B indicates Dome Base, respectively. Contours indicate surface elevations.

ぶように探査ルートを設置した。図上で R/B は中継拠点（74°00'S, 42°60' E, MD364地点と同じ）である。

重力測定は目視による3回読み取りにより実施し、あわせて気圧、気温なども測定した。しかしながら、重力計付属の気圧計と温度計では、それぞれ外気温 -50°C 以下・気圧750 hPa以下での測定が不可能であったため、一部の気象要素については、旅行終了後に気象担当隊員が毎日定時に測定していたデータを補間使用した。

サスツルギによる車両振動の中、旅行期間は述べ100日に及び、ドーム頂上付近（標高3800 m）では外気温 -50°C 以下、気圧600 hPa程度の気象条件であった。このため、重力

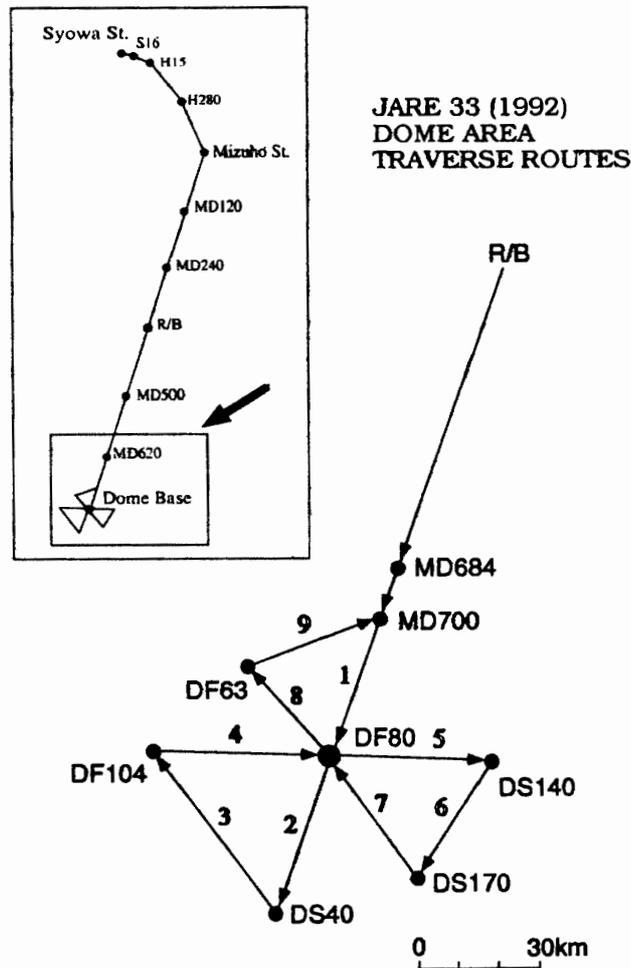


図2 氷床ドーム付近における深層掘削地点調査ルート

Fig. 2. Map showing traverse routes around the Dome area. DF80 is a point near Dome Base, which was established by JARE-26 in 1985. Solid arrows show the direction of the traverse, shaded numbers indicate the order of the traverse.

計の雪上車内輸送時の振動の緩和や保温対策に前もって細心の注意を払った。重力計は防震台上に乗せたまま、断熱材を内壁に貼ってある雪上車に固定した木製の保温箱に入れて輸送した。さらに保温箱の内部には小型ラバーヒータを設置し強制的に保温した。極低温下では外気にさらされた重力計のジュラルミン・ボックスの温度が測定時に急激に低下し、底面に雪が付着するため薄い断熱材で覆った。高所では雪面下で発達した霜ざらめ層のためか車両の振動などによって雪層破壊が生じ、速やかに観測を完了する必要があるが、雪面が締まっていないため計器の支持に時間を要した。長期間1箇所に停滞した場合には、エンジンを停止させ車両燃料の節約に務めた。このため、雪上車からのバッテリー電源供給が停止し、重力計の機械温度が低下したことが原因で、少なくとも2箇所で重力計の読みにとび（テア）が発生した（表1）。11月8日から16日までの期間はドーム頂上付近 BC04 地点にて

観測・車両整備・燃料ドラムのデポ作業などにより長期間停滞した。1日数時間は重力計に電源を供給したにもかかわらず機械温度を低下させてしまった。実際には、これ以外の場所においてもテアが発生した可能性は否定できない。

3. 重力異常の計算

重力異常の計算は、福田（1986）の解析方法を採用し、重力計の常数換算と地球潮汐、機械高の補正を含めて計算した。計算の際に採用したパラメータなどは、以下のとおりである。

標準重力式	重力式 1967
フリーエア勾配	0.3086 mgal/m
仮定密度	2.67 g/cm ³
地形補正	なし

また、2章で述べたようにテアと重力計のドリフトによる影響も考慮した。その補正量は以下のように見積もった。往路と復路とで重複して測定している観測点（S16, H231, Z33, MD510, MD738）における重力値が一致するように、テアの発生が明らかかな2箇所を表1にある補正量を与え、ドリフトレートを-0.076 mgal/dayと見積もった。理想的とは考えにくい長期間の運用条件下のためか、通常の測定でのレート（0.01-0.02 mgal/day程度）と比較すると精度は下がる。求められた各測定点での重力異常はデータレポート（KAMIYAMA *et al.*, 1994）にすべて記載した。

観測点の緯度、経度は雪上車に搭載したGPSにより単独測位で求めたものである。GPS単独測位の場合、水平方向の誤差は数10mであるが、高度の誤差は100mに及ぶ。水平方向の誤差については、緯度方向についてのみ正規重力に影響を与える。しかし精度が悪いときには100m以上の誤差を生じる単独測位の場合の高度の誤差が、フリーエア異常として30mgal程度の誤差を発生させる（伊藤, 1986）。このため、基本観測点（S16, H15, H260, みずほ基地, MD120, MD240, MD364 (R/B), DF80）においては、昭和基地内GPS基準点（69°00'24.7"S, 39°35'06.3"E, 38.771 m; WGS84系での値（金尾・渋谷, 1993）とのGPS干渉測位による結果（DF80については26次隊が求めたJMRによる高度推定値）を固定点とし、その間の各観測点の高度については気圧高度計で補間して求めた値を使用した。最終的にはWGS72楕円体の座標系に変換して表し、誤差は水平誤差数10m、鉛直誤差10m程度に押さえられた。

このようにして求められた高度はWGS72楕円体からの高さであるため、各測点でのジオイド高を補正し海拔高度に換算する必要がある。昭和基地GPS基準点の海拔高度は水準測量により21.154m（神沼ら, 1984）と求められているのに対し、WGS72楕円体高度は43.354mである（SHIBUYA, 1985）から、昭和基地においてはジオイド高は22.2mとなる。本論文では、ジオイド高が昭和基地～ドーム域で一定であるという単純な仮定のもとに楕円

体高度を海拔高度になおし（具体的には上記フリーエア勾配を考慮して 6.85 mgal の正のオフセットを与え）フリーエア異常を計算した。もしジオイド高の揺らぎが 10 m 程度あるとすると、測定鉛直誤差 10 m と合わせて海拔高度の誤差は 20 m となるので、求められたフリーエア異常に含まれる誤差は 6.2 mgal 程度と思われる。

また、氷厚は雪上車搭載型アイスレーダにより求められたものであり、基盤の深さは標高と氷厚とから求めた。アイスレーダは理想的な測定条件においても誤差としては 10 m 程度である。複雑な基盤地形変動の影響、環境条件の異なる広域の氷床内部で電波伝搬速度を一定としたことなどによる誤差を含めると 100 m 程度になることもあろう。詳しくは上記データレポートを参照してほしい。また氷床下部のモレーンを疑似基盤として判断している可能性があることは否定できない。氷厚に 100 m の誤差がある場合、ブーゲ補正には 7.4 mgal の誤差として反映する。また、フリーエア補正の誤差はそのままブーゲ異常の誤差に加算されることになるから、求められたブーゲ異常の誤差はおおよそ 13.6 mgal と見積もられよう。

4. 結果と考察

4.1. 昭和基地—ドーム間

昭和基地—みずほ基地間のルートについては、これまでも何回か重力測定が行われており (ABE 1975; NAGAO and KAMINUMA, 1984; NISHIO *et al.*, 1988)、今回の測定も過去の測定データを支持している。しかし初めて昭和基地から内陸部まで広領域にわたって多点のアイスレーダ観測と重力測定を実施したという観点から、統一して整理した。

GPS と気圧高度計により求められた標高値、標高とアイスレーダによる氷厚測定から求められた基盤地形、および計算により求められた重力異常を緯度方向に投影したものを図 3 に示す。図上部の基盤地形データは重力値を求めた地点のみを表示したもので実際に得られた地形プロファイルの一部である。基盤地形とフリーエア異常のプロファイルには各極値が対応しているという意味で相関が確認できる。すなわちみずほ基地の北側 (70°S)、73°S、MD364 (74°S)、76°S 付近、およびドーム頂上付近に大きな基盤の高まりとフリーエアの増大域を有する。

図 4 には調査ルートにそった平面図を示す。各観測点ごとの基盤地形と重力異常を、その値に比例した半径の円で表した。図 3 では旅行ルート上のプロファイルとして変動部分を議論したがここでは絶対値を問題にする。図 3 の 76°S 付近、およびドーム頂上付近のフリーエア異常の極大値 (図 4—中) は基盤地形の 1500 m に達する高まり (図 4—左) に対応する。しかしみずほ基地北側のフリーエア異常の極大値は同程度であるが、基盤地形の大きな高まりとしてアイスレーダに出現しているものの、その基盤高度としての絶対値は 500 m 程度である (図 3)。沿岸部と内陸部とが同程度に基盤地形高度が増加していることがアイス

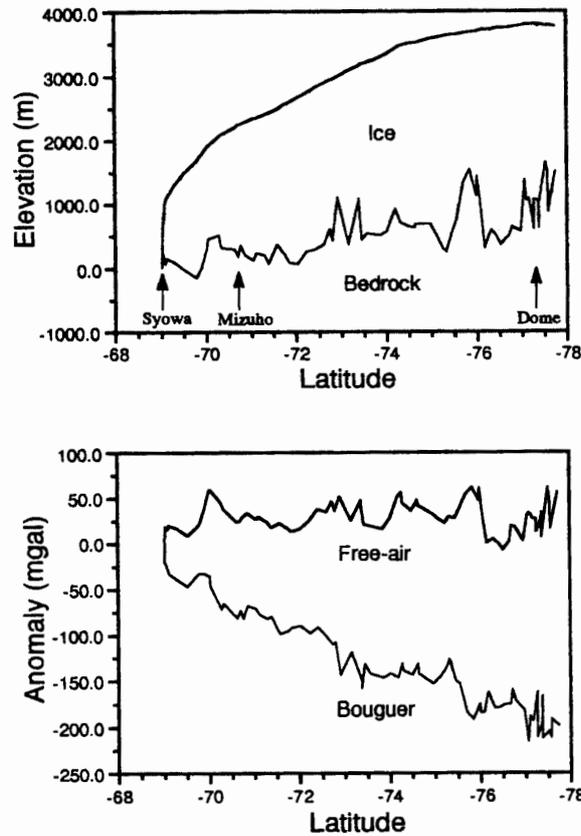


図3 調査ルート上の基盤地形と氷床高度 (上), フリーエア異常と単純ブーゲ異常 (下)

Fig. 3. Surface elevation and bedrock topography along the traverse routes from Syowa Station to Dome Base (upper figure). Free-air gravity anomalies and simple Bouguer gravity anomalies along the traverse routes (lower figure).

レーダ観測で確認された場合には、フリーエア異常については内陸部に比べて沿岸部で大きく増加する。

4.2. ドーム付近

ここではドーム付近について議論する。図5には、氷床ドーム頂上付近における深層掘削地点の調査ルート上での、基盤地形 (上), フリーエア異常 (中), およびブーゲ異常 (下) を示した。DF80を中心とするこの領域は、アイスレーダによる探査ルート上の連続データから周囲を基盤地形の高まりで囲まれた盆地構造をしていることが報告されている (MAENO *et al.*, 1994)。フリーエア異常のデータもこの結果を指示している。このことから、掘削地点ドーム頂上付近でのローカルな基盤地形を推定する上で、重力のデータは貴重であろう。なお、26次隊の重力測定結果 (AGETA *et al.*, 1987) からは、データ密度が低いためこの地域が盆地構造をしていることは確かめることは出来ない。しかしアイスレーダ氷床厚、

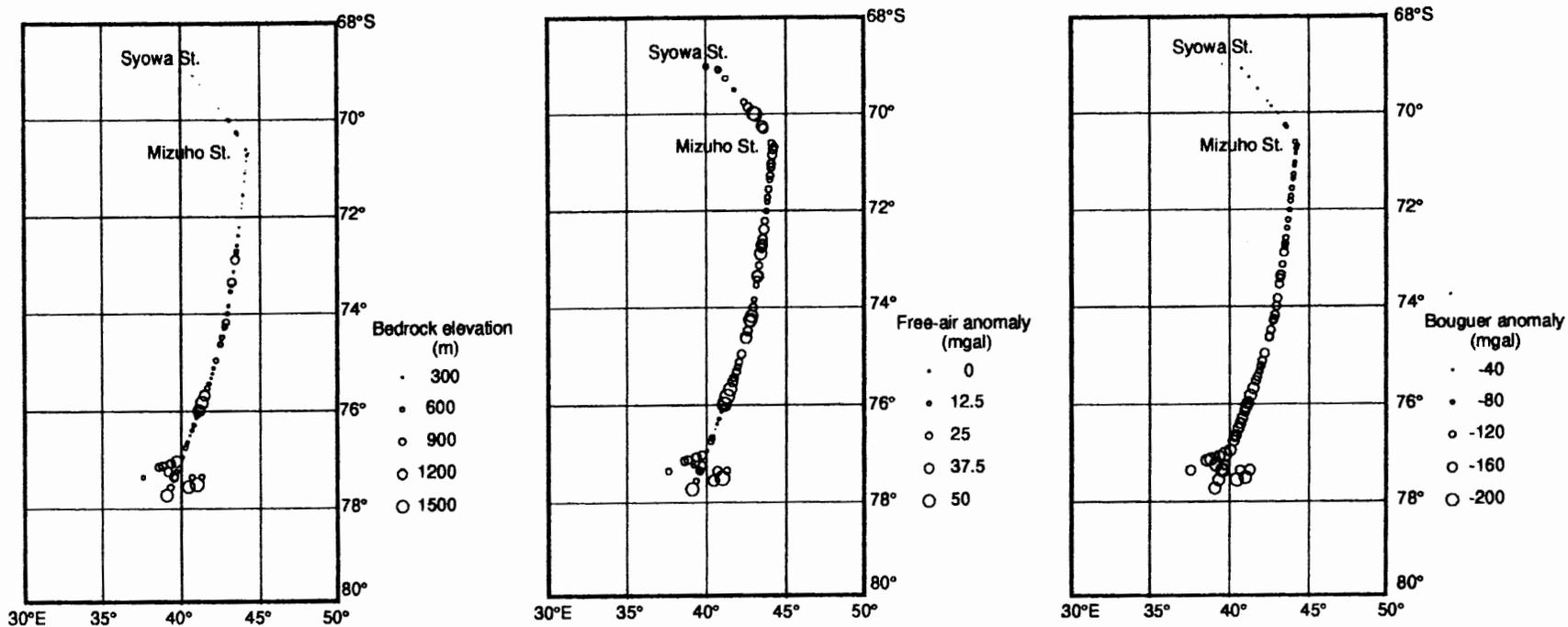


図4 調査ルート上の基盤地形(左)とフリーエア異常(中), 単純ブーゲ異常(右)
 Fig. 4. Bedrock topography (left), free-air gravity anomalies (center), and simple Bouguer gravity anomalies (right) along the traverse routes from Syowa Station to Dome Base. The observation points are shown at the center of circles with the diameter proportional to the values.

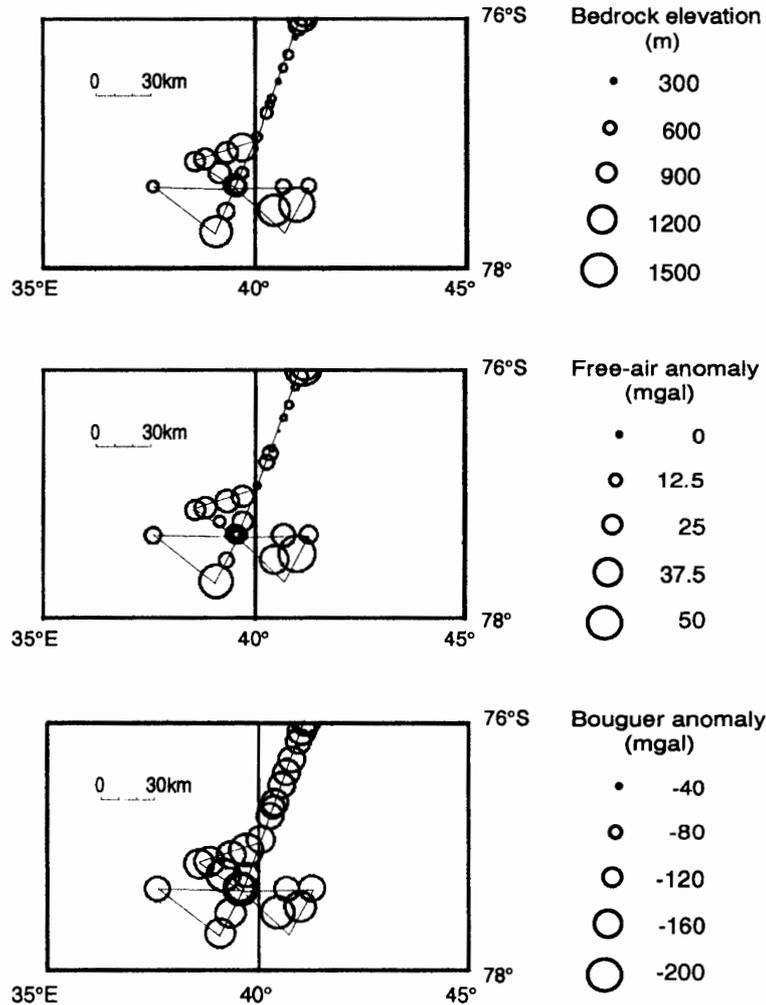


図5 氷床ドーム付近における基盤地形（上）とフリーエア異常（中），単純ブーゲ異常（下）
 Fig. 5. Map showing traverse routes around the Dome area (upper figure). Bedrock topography is shown in the upper figure, free-air gravity anomalies in the middle figure and Bouguer gravity anomalies in the lower figure around the same surveyed area.

フリーエア異常ともに今回の結果と調和的な値として報告されている。

4.3. 重力異常と基盤地形との相関

これまでも内陸や沿岸域での調査旅行の際には，アイスレーダを使用して基盤の深さを計測する他に，重力計によるサーベイも同時に行われることが多かった（NISHIO *et al.*, 1988）。大陸内部，特にみずほ基地付近では基盤からのレーダエコーが減衰により確認できない箇所も確認されており，アイスレーダのデータを補間するうえでも重力のデータは非常に貴重である。今回の測定においてもアイスレーダによるエコーが得られない地域が確認できたが，残念ながら時間的制約からこの問題に着目した重力測定は実施していない。

図6には，測定した基盤地形とフリーエア異常（全観測点（上），ドーム周辺部（下））と

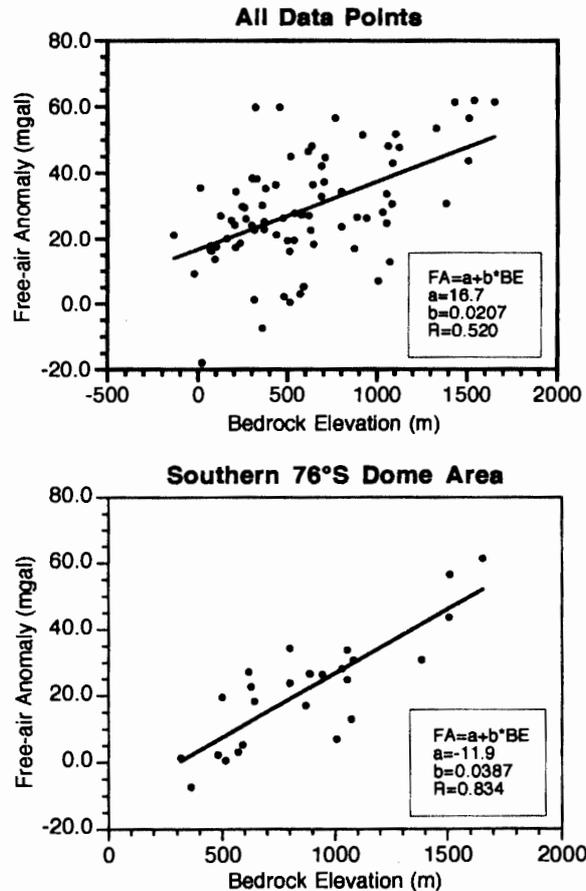


図 6 フリーエア重力異常と基盤地形との相関 (全地域 (上), ドーム付近 (下))
 Fig. 6. Relationship between free-air gravity anomalies (FA) and the bedrock elevation (BE). R indicates the relation coefficient. Upper figure: all the observation points, lower figure: the Dome area only.

の相関をしらべた。縦軸 (フリーエア異常) 方向の偏差が最小となるように、回帰直線を決定している。基盤地形と特にフリーエア異常とに良い正の相関が見られたことはすでに 4.1 章に述べたが、みずほ基地以北の基盤地形の高まりに対応するフリーエア重力値の増大値と、ドーム周辺部の高まりに対応する増大値とは、フリーエア異常の絶対値は同様であるが基盤高度は異なっている。これは基盤地形を含めての地殻の浅い部分の構造がフリーエアの変動には影響しているが、内陸部までに及ぶ広い地域ではモホ面の形状を含む地殻のより深い構造がその絶対値に影響を及ぼすものと考えられる。したがってドーム域に限定した場合 (図 6 下, 相関係数 $R=0.834$) には、ルート上の全観測点についての結果 (図 6 上, 相関係数 $R=0.520$) に比べて相関が良くなっていることがわかる。

なお、図 6 の相関がドーム周辺部で良いことから、アイスレーダによる基盤地形推定の精度が良いと単純に判断してはならないと考えられる。なぜならば、岩石と氷の密度差から求められる理論的な傾きは、氷 (密度 0.90 g/m^3) と基盤岩 (密度 2.67 g/m^3) がなす無限平板

モデルを仮定すれば約 0.074 mgal/m となるが、ドーム域（図 6 下）では 0.0387 mgal/m であり理論的に予測される勾配の半分程度でしかない。このように実際の観測による勾配が理論値より小さいことから、基盤地形と深部構造（特にモホ面の深さ）とに負の相関があることを示唆している。しかし、ドーム域周辺ではすでにアイソスタシーが成り立っていると仮定した場合、上記の勾配の不一致の原因としてはモホ面の形状よりはむしろ、アイスレーダにより測定された基盤地形高度の誤差に起因すると考えることもできる。

5. ま と め

第 33 次南極地域観測隊における氷床ドーム深層掘削地点選定旅行中の観測の一環として昭和基地からドーム頂上域までの重力測定を実施し、その結果について本論文で整理・報告した。

述べ 100 日に及ぶ雪上車での長期旅行であり、かつ内陸部での厳しい気象条件を考えると、今回の内陸域での測定結果は精度としては満足のいくものといえる。氷床コアの深層掘削を実施するドーム頂上付近では、アイスレーダより求められた基盤地形とフリーエア異常とが良好な相関にあった。アイスレーダとあわせて掘削地点を選定する上で貴重なデータをもたらしたものと考えられる。

現在の氷床掘削技術の進歩は、南極氷床基盤に達する掘削と雪氷コア回収を可能としている。アイスレーダや重力測定によって探査された基盤深度の推定値を、実際に確認することも可能であろう。

謝 辞

旅行中の重力測定を実施するにあたり、数々の便宜を計っていただいた福地光男観測隊長をはじめとする第 33 次観測隊隊員の方々に心から感謝の意を表します。また、気象庁の岸隆幸氏からは旅行中の気象データを快く提供していただきました。

この報告をまとめるにあたり、極地研究所の渡辺興亜氏、神沼克伊氏、渋谷和雄氏には準備段階および越冬期間を通してさまざまなご助力と助言をいただきました。京都大学理学部の福田洋一氏には、昭和基地において重力計の取り扱いや重力異常計算ソフトの便宜を計って頂き、またデータ整理の段階で助言をいただき深く感謝しております。金沢大学理学部の長尾年恭氏と工藤健氏、京都大学防災研究所地震予知研究センターの中村佳十郎氏と伊藤潔氏には、いろいろと議論をして頂き、またご助言をいただきました。また、査読者の方をはじめ多くの方々の注意深いご指摘のおかげで文章の改善がなされたことを付記し、ここに厚くお礼を申し上げます。以上の皆様に記して感謝の意を表します。

文 献

- ABE, Y. (1975): Gravity data. JARE Data Rep., **28** (Glaciology 3), 114–119.
- AGETA, Y., KIKUCHI, T., KAMIYAMA, K. and OKUHIRA, F. (1987): Glaciological research program in East Queen Maud Land, East Antarctica; Part 5, 1985. JARE Data Rep., **125** (Glaciology 14), 71 p.
- 藤原 智・渡邊和夫・福田洋一 (1992): 昭和基地における絶対重力測定. 第 12 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 16.
- 福田洋一 (1986): あすか観測拠点と昭和基地の重力結合およびルンドボックスヘッタにおける重力測量. 南極資料, **30**, 164–174
- 伊藤 潔 (1986): 重力. 南極の科学, 5. 地学, 国立極地研究所編. 東京, 古今書院, 213–225.
- 神沼克伊・阿部 馨・田中 等 (1984): 昭和基地での水準測量と重力測量. 南極資料, **83**, 62–74.
- KAMIYAMA, K., FURUKAWA, T., MAENO, H., KISHI, T. and, KANAOKA, M. (1994): Glaciological data collected by the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition in 1992. JARE Data Rep., **194** (Glaciology 21), 67 p.
- 金尾政紀・渋谷和雄 (1993): 昭和基地多目的アンテナ基準点と SCAR GPS 基準点の結合について. 第 13 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 21.
- MAENO, H., KAMIYAMA, K., FURUKAWA, T., WATANABE, O., NARUSE, K., OKAMOTO, K., SUIZU, T. and URATSUKA, S. (1994): Antarctic ice sheet measurements using a mobile radio echo sounder. to be published in Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **8**.
- NAGAO, T. and KAMINUMA, K. (1984): Estimation of the crustal structure and the bedrock topography by the gravitational method around Syowa Station. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **33**, 1–8.
- NAGAO, T. and KAMINUMA, K. (1988): Gravity survey in the Mizuho Plateau. JARE Data Rep., **132** (Earth Science 4), 1–32.
- 長尾年恭・栗原 勝・神沼克伊 (1991): 南極みずほ高原の地形・重力異常図の三次元表示. 南極資料, **35**, 56–69
- NISHIO, F., OHMAE, H. and ISHIKAWA, M. (1988): Bedrock and ice surface profiles in the Shirase Glacier basin determined by the ground-based radio-echo sounding. Bull. Glacier Res., **6**, 33–39.
- SHIBUYA, K. (1985): Performance experiments of an NNSS positioning in and around Syowa Station, East Antarctica. J. Phys. Earth, **33**, 453–483.
- YANAI, K. and KAMINUMA, K. (1971): Measurement of gravity along the traverse route Syowa-South Pole. Report of the Japanese traverse Syowa-South Pole 1968–1969. JARE Sci. Rep., Spec. Issue, **2**, 131–150.

(1993 年 11 月 24 日受付; 1994 年 1 月 20 日改訂稿受理)