

第38次南極地域観測隊地学部門の野外観測における 地球物理学的研究 (1996–1998)

金尾政紀¹・東 敏博²

Geophysical research from field observations by the Earth Science Division in the 38th Japanese Antarctic Research Expedition (1996–1998)

Masaki Kanao¹ and Toshihiro Higashi²

Abstract: Several geophysical field research observations and geodesic surveys were conducted during the wintering season of the 38th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-38) in 1996–1998. Lithospheric structure and evolution of the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica were obtained from continuous observations by portable broadband seismographs and from gravity surveys on outcrops around the Sôya Coast region. Several GPS measurements both on the outcrops along the Sôya Coast and on the ice sheet from the coastal area near Syowa Station to the inland of Dome Fuji Station area will give information on crustal uplift due to glacial rebound, on mass reduction and surface movement of the continental ice sheet, and on crustal thickness up to the Dome Fuji Station area. Moreover, some test measurements concerning the seismic refraction/reflection experiments by the SEAL (Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere) project were carried out in the JARE-38 wintering season. Such instruments as a steam water ejective-type ice/snow-drilling system, an expendable ground system segment (GSS), and long term batteries were repeatedly tested to determine whether they operate properly in Antarctic meteorological conditions. Additionally, seismic array observations using short period seismometers on the ice sheet were conducted in order to investigate the properties of seismic wave propagation on the ice sheet and to detect the lower crustal reflected layers on the Mizuho Plateau, which were already suggested by NMO analyses for the JARE-21 refracted data.

要旨: 第38次日本南極地域観測隊(1997年度)の地学研究部門において、野外における地球物理学の観測をいくつか実施した。その主たる目的は、リュツォ・ホルム湾地域の地殻および上部マントル(いわゆるリソスフェア)の構造と進化過程を、地震学的・測地学的手法を中心に研究することである。沿岸露岩域では、湾周辺の地殻構造を面的に調べるために、可搬型の広帯域地震計および短周期地震計を複数台設置して、記録される遠地地震波形を解析した。また、可搬式重力計による測定で得られたブーゲ異常により、宗谷海岸に沿ってのモホ面の深さ分布を推定した。さらに、沿岸露岩調査や内陸旅行においてGPS観測を行い、これまで特にデータの少ない内陸のみずほ基地からドームふじ観測拠点間の測定により、南

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 京都大学大学院理学研究科. Graduate School of Science, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502.

極大陸内陸部の氷床の流動と地殻構造の推定にとって貴重なデータを得た。一方、第38次隊より実施中の「東南極リソスフェアの構造と進化の研究計画（SEAL計画）」の一環として、氷床上での短周期地震計によるアレイ観測、スチーム式ボーリング装置の掘削試験、投下式地震計（ペネトレーター）の無線試験、長寿命電池の電圧降下試験等の、短周期地震波による地殻構造探査と機器類の諸試験を行った。これは将来の構造探査において使用することを前提に機器の開発を重ねると共に、アレイ観測データの波形の相関を調べることを等をして氷床上での波動伝播特性を研究する。また、過去の屈折法探査データの反射法的処理から得られている下部地殻における反射層の一部を検出し、みずほ高原の地殻構造を詳細に探ることも目的とする。

1. はじめに

第38次日本南極地域観測隊（以下 JARE-38 と略す）は、南極観測における第V期5カ年計画の初年度に当たり、前次隊までの地球物理定常部門が廃止された。その代わり、関連するすべての地球物理学的諸観測項目が再分類され、新たにモニタリング研究観測およびプロジェクト研究観測として区分された。

モニタリング研究観測は、地震観測や海洋潮汐観測をはじめ、これまで地球物理定常部門として行っていた項目を中心としている。また近年 GPS 観測、重力潮汐観測等も連続的にデータ取得しているため、これらの項目も含めて固体地球物理学的な種々の変動現象（地震活動・地殻変動・海水準変動・氷床変動、等）を、30年以上を目安とした長期間に渡りモニタリングすることを主な目的としている。

プロジェクト研究観測としては、人工衛星の追尾や大型計測機器により、汎地球的な変動現象（プレート運動・核やマントルのダイナミクス、等）の監視を行い、固体地球物理学的に解明することを目的とするものであり、基地の主要な地学関連施設で連続観測されている。それに対して、越冬中の野外での機動観測や、航空機による偵察を中心に、リュツォ・ホルム湾地域を中心とする地殻および上部マントル（いわゆるリソスフェア）の構造と進化過程を、主に地震学的手法により研究することを行った。

以下は、プロジェクト研究観測における野外での種々の地球物理学的観測について、JARE-38 越冬中（1997年2月～1998年1月）の経過を中心に項目別に記す。図1には、越冬期間中の地学研究部門の観測状況についての概要を時系列で示した。沿岸・内陸での行動を中心に記載しているが、比較のため基地における諸観測、ならびに航空機（セスナ機）による調査フライトについても示した。

2. 沿岸露岩域における広帯域地震計観測

2.1. 目的と観測システム

リュツォ・ホルム湾周辺域の地殻構造を特徴付ける一つの物理パラメーターである地震波横波（S波）の速度モデルは、これまで昭和基地の STS-1 のデータを中心に得られている

	基 地 (地震、重力、潮汐)	沿 岸 (地震、重力、GPS)	内 陸 (地震、重力、GPS)	航空機 (空撮、調査)
Dec. 1996		ストランニッパ、 スカーレン設置		
Jan. 1997	地震・LANケーブル敷設			
	PRARE-GS基台設置	ストランニッパ、 スカーレン撤収		
Feb.	地震計室電気配線工事	ラング袋浦、とつつき岬設置	とつつき-S16ルート引き継ぎ	宗谷海岸
Mar.	PRARE-GS立ち上げ 地震センサー移設		ルート工作開始	プリンス・オラフ海岸
Apr.	地震システム更新 (越冬保守、観震)		基地内アレイ とつつき海水ルート完成	
May	超伝導ヘリウム液化	とつつき保守 ラングルート完成	S16ボーリング、アレイ S16アレイ回収、GPS	宗谷海岸
June (極 夜)		ラング袋浦保守		
July			基地内アレイ S16機・車両オペ	
Aug.		とつつき保守 スカルルート完成		
	(越冬保守、観震)		S16機・車両オペ S16ボーリング、アレイ	
Sep.	超伝導ヘリウム液化 (越冬保守、観震)	スカーレンルート完成 ラング保守	SM100車両整備 みずほ旅行、 Hルートアレイ、ボーリング	プリンス・オラフ海岸
Oct.	(データ伝送)	とつつき撤収 スカーレン移設	ドーム補給旅行、 重力、GPS	宗谷海岸 大陸滑走路調査 標表帯・モレーン調査 氷縁監視
Nov.		ラング、スカーレン保守		
	旧地震計室撤収	ラング、スカーレン保守	向い岩ボーリング ベレトレーター無線試験	プリンス・オラフ海岸 大陸滑走路調査
Dec.				
	超伝導ヘリウム液化	ラング移設、スカル設置 スカーレン保守		
Jan. 1998	基地観測引き継ぎ			
		ラング、スカル保守、 スカーレン->とつつき移設	とつつき-S16ルート引き継ぎ	
Feb.				

宿泊を伴う旅行

図 1 JARE-38 越冬地学部門年間行動

Fig. 1. Research schedules of the Earth Science Division of JARE-38 in 1996-1998.

(Kubo *et al.*, 1995; Kanao *et al.*, 1997; 久保・金尾, 1997). それらの結果からは、5 億年前の火成活動に関連したと考えられる、表層地質のグラニュライト相～角閃岩相相当の変成岩の漸移との関連で、地殻内部の S 波速度の水平方向の揺らぎが、グラニュライト相相当の露岩域ほど大きいことが指摘されている (Kanao, 1997).

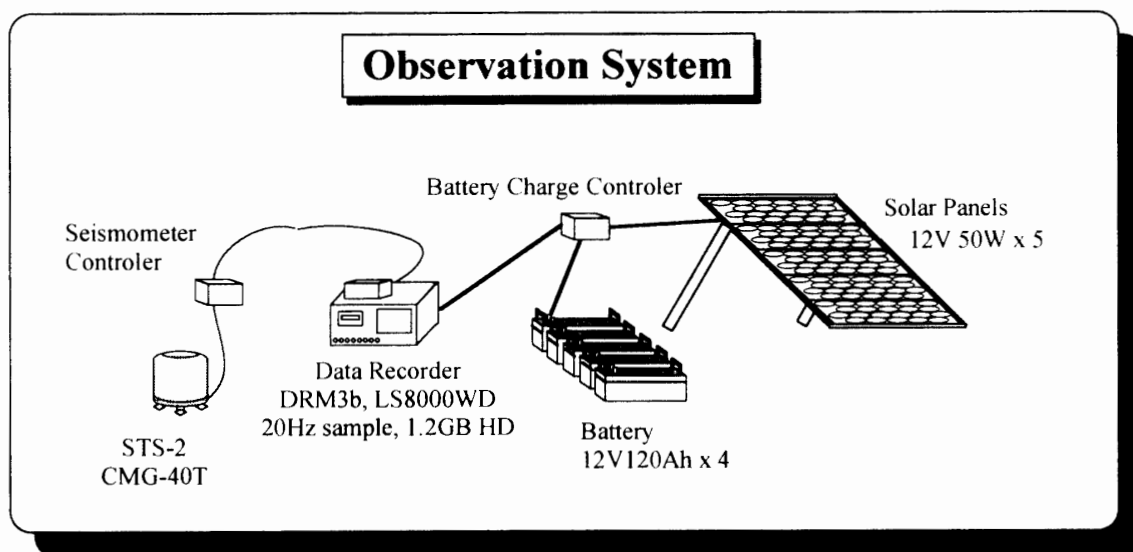


図 2 沿岸広帯域地震計の観測システム

Fig. 2. Block diagram of the recording system of portable broadband seismographs on outcrops around the Sôya Coast region.

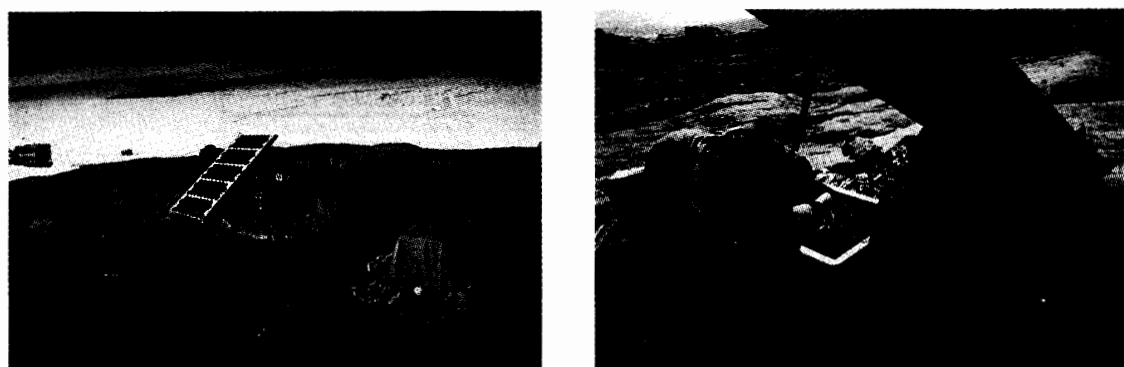


図 3 沿岸広帯域地震計の観測風景(左; とつuki 岬 /b, 右; ラングホブデ雪鳥沢)

Fig. 3. Field portable broadband seismographs at Tottuki Point/b (left) and at Langhovde/Yukidori Valley (right).

しかしこれらの結果は 1 点のみの解析であるため、空間的な分布が求められなかった。そのため本研究観測では、昭和基地周辺のリュツォ・ホルム湾沿岸域の複数の露岩に設置した可搬型広帯域地震計 (CMG-40T, STS-2; 3 成分一体型) で記録した遠地地震波形を解析することで、宗谷海岸周辺のモホ面の深さと地殻内速度の不均質分布に焦点を当て、地殻・最上部マントルの地震学的構造を探ることにした。

観測システムは図 2 に、その設置風景は図 3 に、それぞれ示した。電源として太陽電池 (12 V 最大出力約 50 W × 5 枚) と鉛電池 (12 V 100 Ah × 5 個) とを並列につなぎ使用し、データレコーダー (DRM3b) により、光磁気ディスク (MO) に 10 Hz, または 20 Hz サンプルの連

続収録とした。1 日 1 ファイルを作成し、10 Hz サンプルの場合 230 MBytes の光磁気ディスクで約 40 日間の連続収録が可能である。しかし、JARE-40 より外付けハードディスク (1.2 GB) に記録する広帯域地震計専用ロガー (LS8000-WD) にすべて入れ換えるため、20 Hz サンプルで約半年間の収録が可能となる。

2.2. 観測の経過

JARE-38 夏期間においては、JARE-37 観測点の撤収と移設を行った。一式はパッダ島に設置のものを、1996 年 12 月末にしらせ氷河下流近くの露岩ストラニッパに移動し、その後 1 カ月間観測を行った。また JARE-38 持ち込みの一式は、夏期間中の同時期にスカーレン/大池北に設置した。JARE-37 から JARE-38 夏期間までの観測状況は、Negishi and Kanao (1998) に詳しく記載されている。

JARE-38 越冬中では、上記二つの観測点を夏期間において、「しらせ」ヘリコプターにより移設し、ラングホブデ/袋浦北観測点を 1 月末より、とっつき岬/a 観測点を 2 月初めよりそれぞれ収録を開始した。越冬前半の 3 月下旬以降にとっつき岬へのルート工作を行い、4 月以降に a 観測点の鉛バッテリー交換と MO データの回収を、S16 でのオペレーションにおける通過時などを利用して随時行った (図 1)。5 月末に地震計センサーとレコーダーを回収して、極夜の時期に地学棟で調整を行った。ラングホブデ/袋浦北観測点は、ルート工作が遅れたため 6 月初めになってようやくデータとレコーダーを回収し、これも極夜期に地学棟で調整を行った。

越冬後半は、7 月下旬よりとっつき岬/a 観測点を、8 月上旬にラングホブデ/袋浦北観測点を、それぞれ再開した。その後、とっつき岬/a 観測点は内陸旅行の準備時のため S16 への通過時を利用して保守作業を行い、スカーレン/大池西へ移設する 10 月上旬まで観測を続けた。ラングホブデ/袋浦北観測点の保守のため、11 月末まで月に 1, 2 回の割合で沿岸調査旅行を実施し、スカルブスネス、スカーレン方面への通過時には必ずデータ・バッテリーの確認作業を行った。スカーレン/大池西観測点は、とっつき岬/a 観測点の器材をそのまま移動した。JARE-39 夏期間の 12 月末に「しらせ」ヘリコプターで保守を行い、その後 1998 年 1 月末に撤収するまで、約 4 カ月間観測を行った。

JARE-39 夏期間にはスカーレン/大池西観測点の保守のほか、12 月末にラングホブデ/袋浦北観測点の撤収、ならびに雪鳥沢観測点への移設を行った。さらに、JARE-39 でも一式を持ち込み、新たにスカルブスネス/きざはし浜観測点を設置し、夏期間は計 3 箇所ですべて同時観測を行った。その後、スカーレン/大池西から撤収した一式を、1998 年 2 月中旬にとっつき岬の JARE-38 設置点 (a) とは異なる場所 (b) へ再度設置した。JARE-39 越冬中も計 3 箇所での観測・保守を継続して行っている。

以下に、JARE-37, -39 との共同観測点も含み、各観測点の設置期間を時系列に示す。また、

[設置露岩/場所]	[設置期間]	[緯度 (S)]	[経度 (E)]
パッダ島	1996. 09. 08-1996. 12. 28	69°55.2'	38°23.4'
ストランニッパ	1996. 12. 28-1998. 01. 28	69°58.2'	38°49.2'
スカーレン/大池北	1996. 12. 29-1998. 01. 28	69°40.2'	39°24.6'
ラングホブデ/袋浦北	1997. 01. 28-1998. 06. 02, 1997. 08. 05-1997. 12. 18	69°11.4'	39°38.4'
とっつき岬/a	1997. 02. 04-1997. 05. 27, 1997. 07. 17-1997. 10. 07	68°54.6'	38°49.8'
スカーレン/大池西	1997. 10. 13-1998. 01. 31	69°40.4'	39°24.5'
ラングホブデ/雪鳥沢	1997. 12. 19- (39次継続)	69°14.6'	39°42.8'
スカルブスネス/きざはし浜	1997. 12. 22- (39次継続)	69°28.4'	39°36.4'
とっつき岬/b	1998. 02. 11- (39次継続)	68°54.7'	39°49.7'

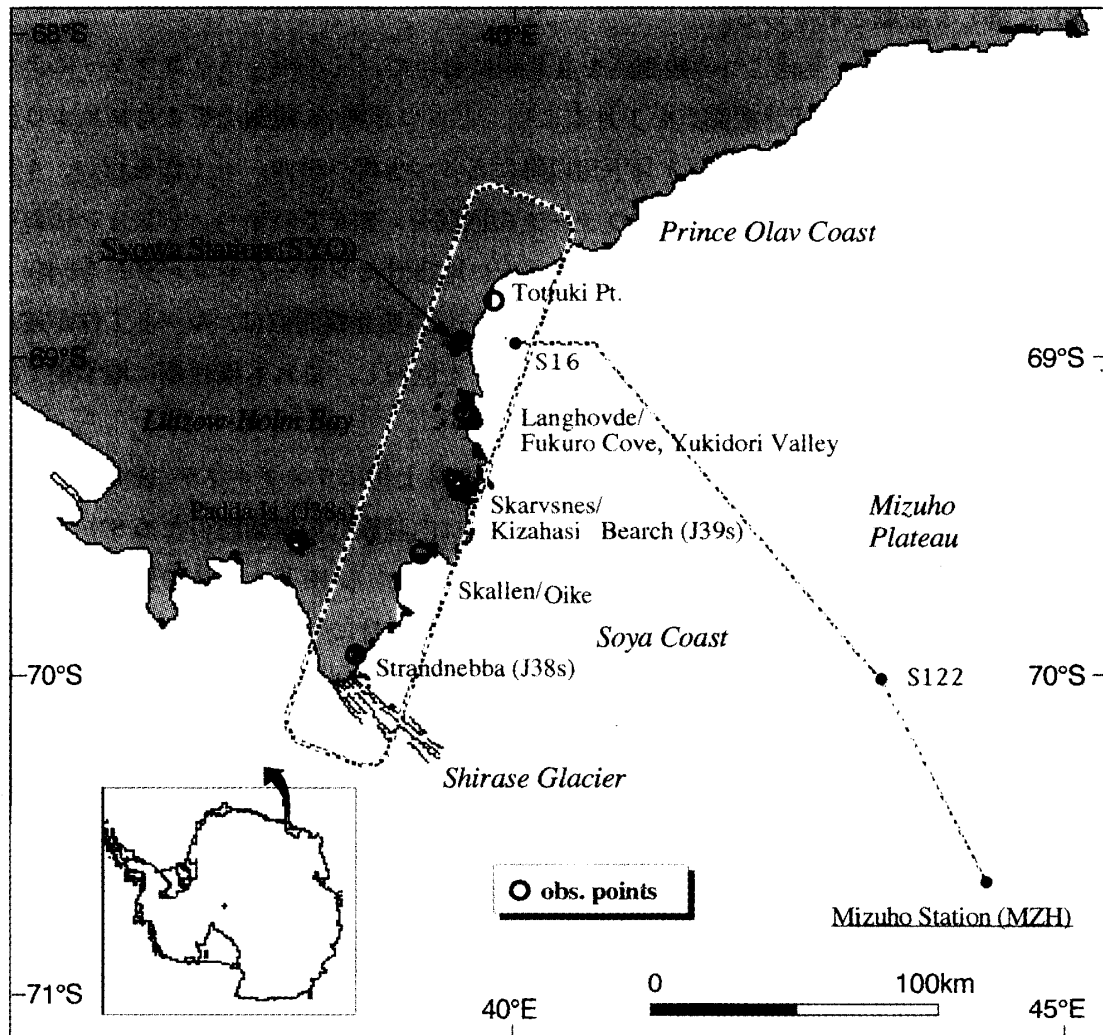


図 4 沿岸広帯域地震計の設置点

Fig. 4. Location of the observation points for field portable broadband seismographs on the outcrops around the Sôya Coast region.

設置露岩の場所を図 4 に示す.

2.3. レシーバ関数解析

ストランニッパ (STR) 周辺, パッダ島 (PAD) 周辺, 及び昭和基地からとつiski岬 (TOT) 方面とラングホブデ (LNG) 方面へ至る領域における, 遠地地震の地震波形を用いたレシーバ関数 (地殻内部の S 波レスポンス) を求めた. レシーバ関数により, 地震波インピーダンス (地中の岩石速度と密度に関連したパラメーター) 比の強い, モホ面や地殻内部の境界面からの反射波を直接みることができ, それらの深さ分布が推定できる.

得られたレシーバ関数を, 宗谷海岸に沿って北から南へ並べることで, モホ面の深さの変化を調べた. 図 5 に示したように, 直達 P 波から 4–5 s 後に, モホ面からの $P \rightarrow S$ 直接変換波 (Ps 波) が 4 本すべてのレシーバ関数のトレースで確認される. しかし, PAD 周辺では大きな振幅の Ps 変換波はみられないため, モホ面反射波はあまり顕著ではないことが分かる. 地殻内からの Ps 波は, 宗谷海岸南部のトレース 2 本では, やや複雑な波形として現れている. これまでの予備的な結果からは, 1) 宗谷海岸の北から南に向けて, Ps 波走時から推定されるモホ面の深さは変化は少ないもののやや深くなる傾向がある, 2) PAD, STR 等南部では地殻内不均質がやや大きい, ことが推定される. 1) は, 4.2 章で述べる重力異常値のデータからも示唆される. 2) については, しらせ氷河に近づくにつれて, リュツォ・ホルム岩体の変成軸に近いほど, 変成作用時に地殻が圧縮された結果複雑な構造をしていると考えられる (Hiroi *et al.*, 1991). 現在のところ, 各観測点において一つの地震データのみの解析であるた

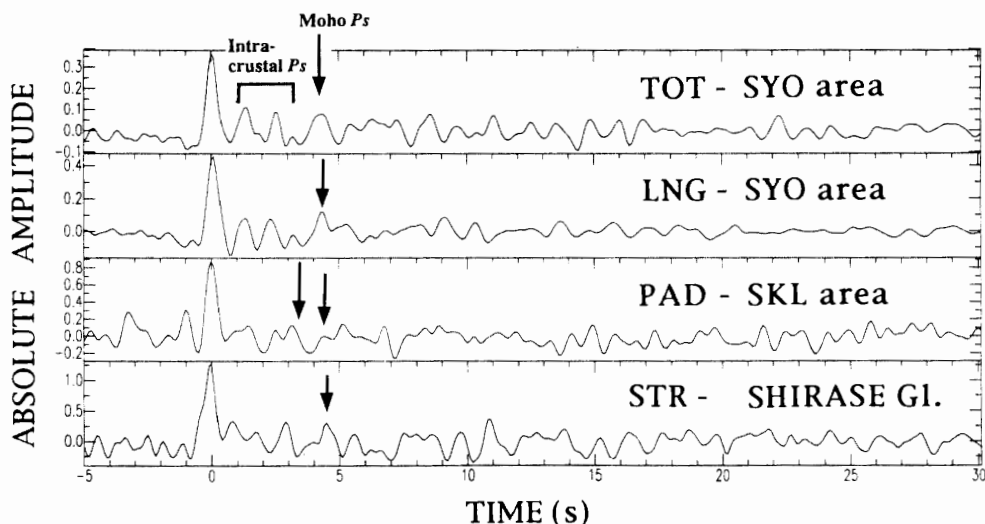


図 5 レシーバ関数波形 (上からとつiski岬-昭和基地領域, ラングホブデ-昭和基地領域, パッダ島-スカーレン領域, ストランニッパ-しらせ氷河領域)

Fig. 5. Observed radial receiver functions 5 s before and 30 s after P -arrival. From the upper trace to the lower (TOT-SYO area, LNG-SYO area, PAD-SKL area, and STR-S. Glacier area). The intra-crustal and Moho Ps phases are indicated by solid arrows.

め、今後さらにデータを追加してスタッキング等の処理を行い、解析精度を高める予定である。

さらに、JARE-39以降も継続して得られるデータにより、各観測点での解析数を追加すると共に、スカルプスネス等の新たな観測点での結果を増やすことが期待される。また、観測されたレシーバ関数に、一次元速度モデルから期待される合成波形とをインバージョン法により合わせることで、観測点直下の深さ 60 km 程度までの S 波速度の一次元モデルを求めることができる。

2.4. データ利用と今後

沿岸露岩域の広帯域地震計データからは、レシーバ関数解析以外にも、昭和基地を含めての 15 km 間隔程度となる大規模スパン観測網としてアレイ的に解析することで、地球中心核、及び下部マントル境界の不均質構造や異方性を探ることが期待される。また、南極プレート周辺の地震を用いての表面波解析により、南極大陸及びその周辺海域の上部マントルの構造が面的に推定される。

今後の観測点の予定としては、JARE-41 にスカーレンに再度 1 点を追加すると共に、宗谷海岸以外の地域、すなわちプリンス・オラフ海岸やアムンゼン湾・ケーシー湾地域においても、夏期間を中心にデータを取得する。そして、エンダービーランドから東クィーンモードランドにまたがる東南極楕状地における、より広範囲での構造解析が期待される。

3. 短周期地震波による地殻構造探査と機器開発

JARE-38 より実施中の「東南極リソスフェアの構造と進化の研究計画 (SEAL 計画)」の一環として、JARE-41 以降に計画されている人工地震実験による地殻構造探査のために、氷床上での短周期地震計によるアレイ観測、発破孔掘削用のスチーム式ボーリング装置の試運転、小型ヘリコプターからの投下式地震計 (ペネトレーター) の地上での無線試験、極域観測用に選定した長寿命電池の電圧降下量推定等の予備試験を行った。JARE-38 における主な目的は、短周期地震波を用いてのみずほ高原の地殻構造の予備的な解明調査と、それに関連した機器の開発のための試験運用である。

3.1. 氷床上でのアレイ観測

内陸ルート上において地殻構造探査用地震波形収録装置を用いた短周期地震アレイ観測を行った。これは将来エンダービーランド/アムンゼン湾で計画されている構造探査において使用することを前提に、氷床上での波動伝播特性を研究し波形の相関を調べて氷床の影響を評価すると共に、過去の屈折法探査データの反射法的処理から得られている下部地殻における反射層 (Ito and Kanao, 1996) を検出し、みずほ高原の地殻構造を探るためである。

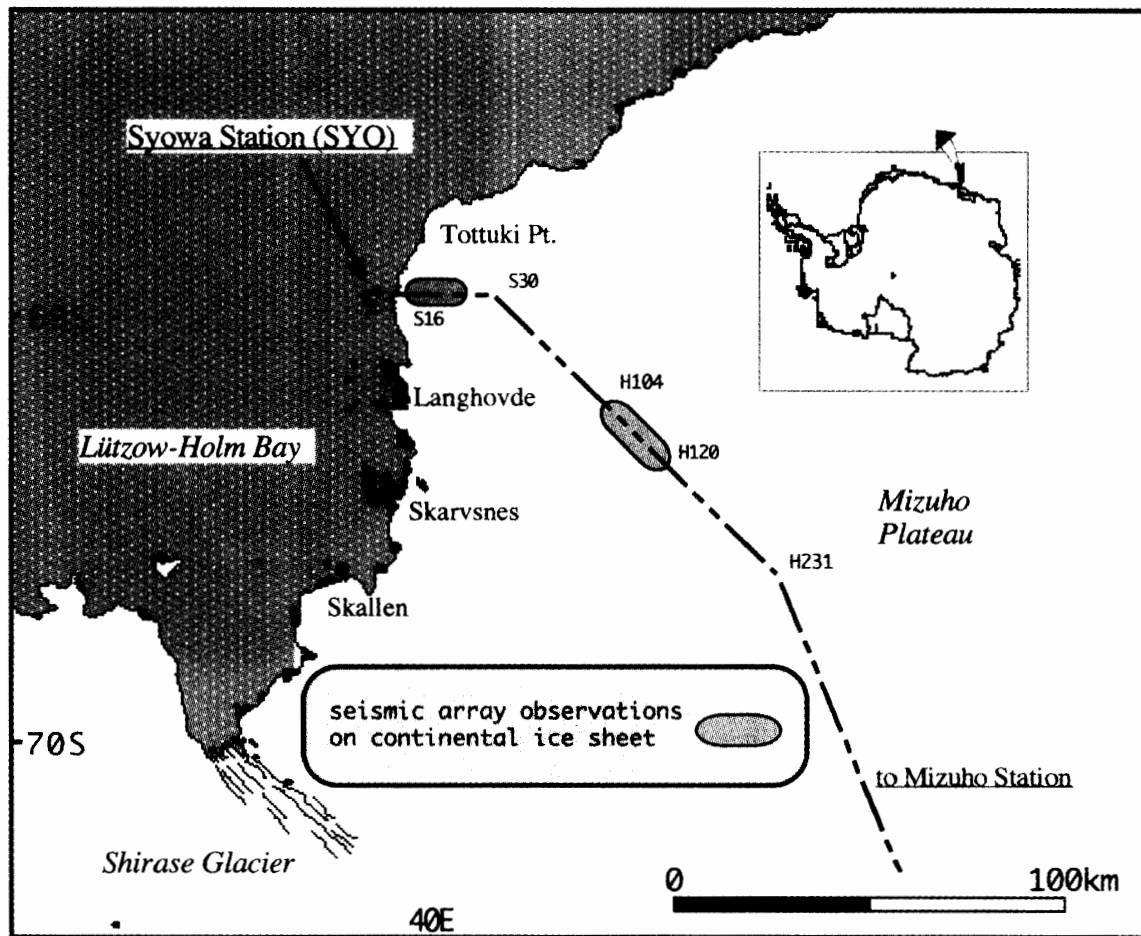


図 6 短周期地震計アレイ観測点位置

Fig. 6. Location of observation points for seismic array observations using short period seismographs on the ice sheet near S16 and along the H-routes (H104-H120).

収録装置 (LS8000SH) は、地震・火山探査用として小型軽量に開発されたもので (森田・浜口, 1996), これまで極域での観測実績もある (田中・金尾, 1996). GPS 衛星の信号を捕獲して内部時計の校正を行う. 1997 年度は 5 台を持ち込みそれらを並べてアレイ観測網として使用した. 基地内地学棟付近での試験観測と, S16~みずほルートにかけての本観測とを合計 7 回行うことができた. 地震計は固有周期 4.5 Hz の 3 成分一体型 (L28B) と, 固有周期 2 Hz の上下動地震計 (L22D) とを, LS8000SH の 4 チャンネルに並行に入力した. 氷雪上や土砂中にセンサーのスパイク部分を挿入して設置した. バッテリーは, 長寿命かつ低温特性が良いとされる 2 種類のサイクロン電池 (6V 25 AH, 6V 5 AH) を観測期間に応じて使い分けた. サンプルング周波数は, すべて 50 Hz で収録した.

以下に, アレイ観測を行った場所と期間を設置した順番に示す. 図 6 には, 内陸ルートにおけるアレイ観測の実施範囲を, またその設置風景を図 7 に示した. 観測点の座標については, 同時に測定した重力値の結果 (表 1, 2) に記載した.

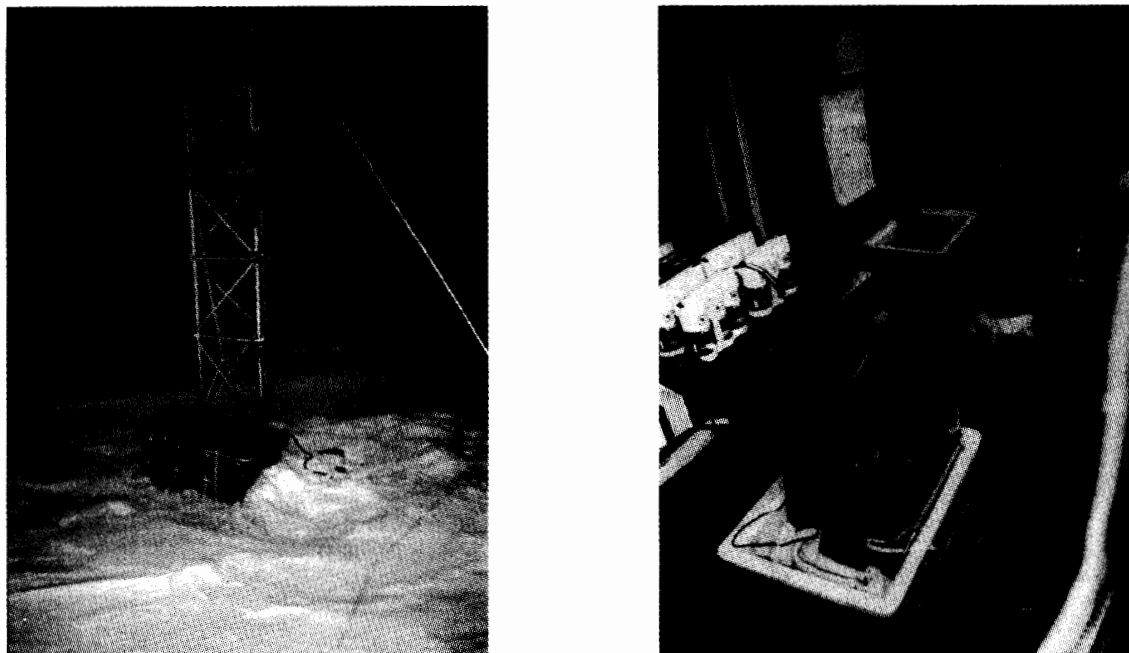


図 7 短周期地震計アレイ観測点

Fig. 7. Seismic array observations using short period seismographs on the ice sheet near S16 (left) and the preparation at the Earth Science Laboratory at Syowa Station (right).

〔設置場所〕	〔アレイ間隔〕	〔設置期間〕
地学棟周辺	6 m	1997. 04. 27-1997. 05. 02
S16 周辺	300 m	1997. 05. 10-1997. 05. 21
地学棟周辺	12 m	1997. 07. 08-1997. 07. 13
S16 周辺	300 m	1997. 08. 20-1997. 08. 23
H ルート	2000 m	1997. 09. 20-1997. 09. 23
地学棟周辺	18 m	1997. 10. 24-1997. 10. 28
地学棟周辺	18 m	1997. 11. 28-1997. 12. 02

4 月よりケーブル結線等の諸準備を行い、4 月末から 5 月初めにかけて地学棟周辺で約 6 m 間隔で試験観測を行った。地学棟周辺での設置はすべて、等間隔に配置している気象棟から電離層棟にかけての基地電源ラックを利用し、ラック支柱の真横の雪氷に地震計スパイクを差し込んだ。その後、7 月上旬、10 月下旬、11 月末～12 月初めにかけて地学棟周辺でそれぞれ約 12 m, 18 m, 18 m 間隔での観測を行い、順調に 5-10 日分のデータを取得した。

5 月上旬の S16 への調査旅行時に、とっつき岬～S16 周辺の内陸ルート (No. 42～No. 45) にて約 300 m 間隔で地震計を設置し、約 10 日間のデータを取得した。また 8 月下旬の調査旅行の際に、5 月とは別の場所 (No. 46～No. 50) で同様に設置した。その後、9 月のみずほルートでの調査旅行中には、H104～H120 において約 2 km 間隔で往路に設置、復路に回収するオペレーションを組み、50 Hz サンプルで収録し約 4 日間分のデータを取得した。この期間中に 9 月 20 日の Kermadec Islands の地震 ($M_b=6.1$) が記録されたが、その波形を図 8 に示し

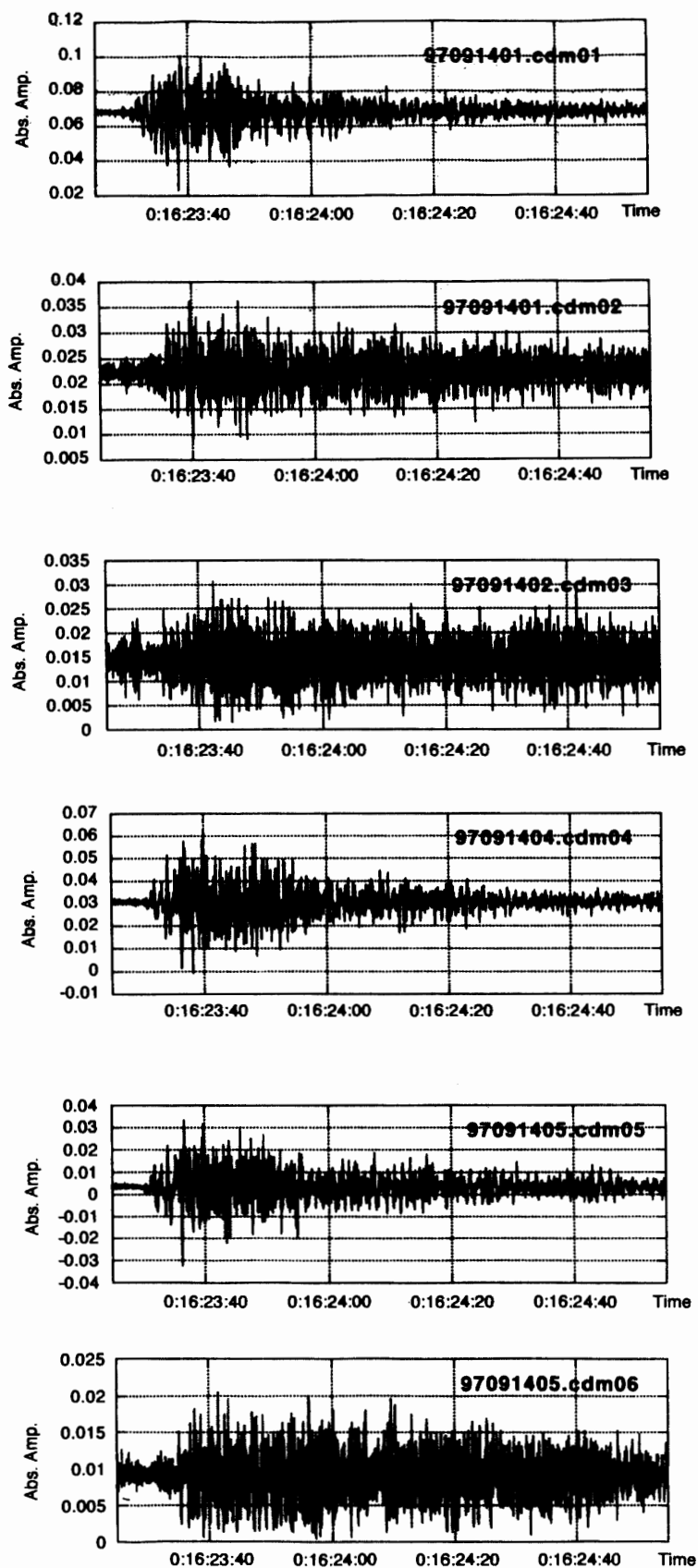


図 8 みずほルート・アレイで取得した Kermadec Islands の地震

Fig. 8. Digital waveforms of the seismic array observations using short period seismographs on the ice sheet along the H-routes (H104-H120) for the Kermadec Islands Earthquake ($M_b = 6.1$) in September 20, 1998. (from upper to lower traces: 97091401.cdm01; H104; L22D-UD, 97091401.cdm02; H104; L28B-UD, 97091402.cdm03; H108; L28B-UD, 97091404.cdm04; H116; L22D-UD, 97091405.cdm05; H120; L22D-UD, 97091405.cdm06; H120; L28B-UD)

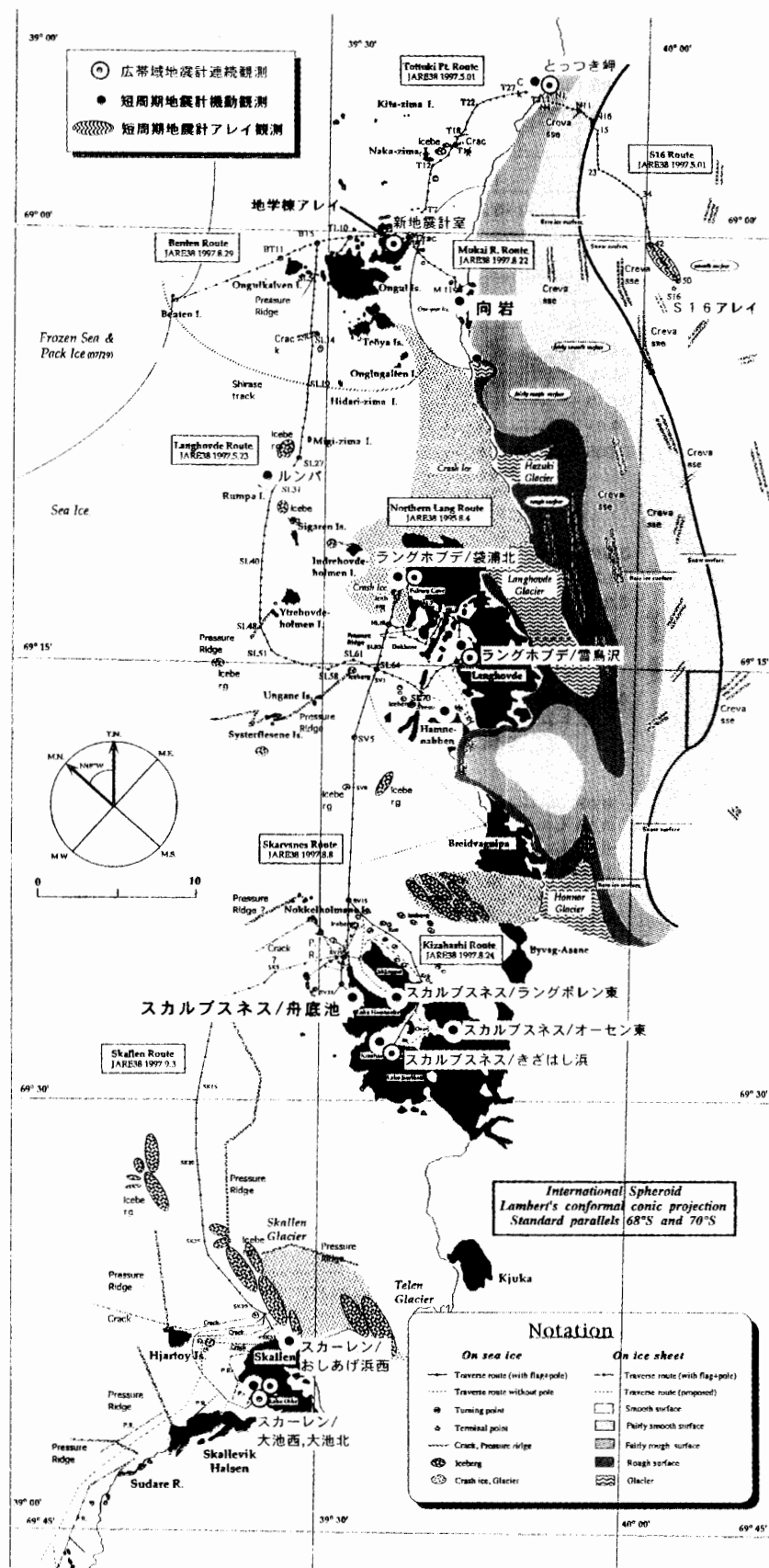


図9 昭和基地周辺の沿岸露岩での短周期・広帯域地震計設置点, ならびに大陸上の短周期地震計アレイ観測点位置 (JARE-38 越冬中の海水ルートを含む)

Fig. 9. Location of observation points for short period and portable broadband seismographs on outcrops and on the ice sheet near Syowa Station, together with the JARE-38 traverse routes.

た。

これらの観測データはすべて、専用パソコンにシリアル・ケーブルにより吸い上げを行い、その後地学棟のワークステーションのハードディスクへ転送を行った。現地での収録用パラメーターの設定、吸い上げたデータの波形表示、その他の前処理もすべて、専用パソコン上で行った。ワークステーション内のデータは、DAT テープ (2 GBytes) へ保存して持ち帰った。今後は本格的にセンブリンス解析等の波形相関を調べたり、地震データの反射法的処理により下部地殻反射層の検知を試みる。

3.2. 沿岸露岩域での機動観測

短周期地震計をリュツォ・ホルム湾沿岸露岩の複数箇所に設置して、記録される遠地地震波形を解析することで、当該地域の地殻および最上部マントルの地震学的構造を面的に探ることを目的としている。広帯域地震計による連続観測 (2 章)) を補うデータを取得する。越冬後半を中心に、広帯域地震計の保守および重力測定を含めた沿岸旅行で可能な限り実施した。リュツォ・ホルム湾沿岸露岩の設置点を図 9 に示す。JARE-38 越冬中の保守旅行に用いた海氷ルート、基地周辺の広帯域地震計観測点 (2 章で既述)、ならびに短周期地震計アレイ観測点 (3.1 章で既述) も一部含む。

収録装置は、2 章で使用したものと全く同一であり、各旅行時の往路に設置し復路に回収する観測方法で行った。S/N 比を上げるための場所として、可能な限り雪氷上ではなく堆積層もしくはモレーンを選び、地震計センサーのスパイク部を差し込み設置した。しかし、堆積層等がない場所では、内陸旅行と同様に雪面に直接スパイクを突き刺した。雪上車 (特に SM40) に荷積みするが多かったため、軽量かつ保温性の高いプラスチック製保温箱 (65 × 45 × 36 cm³, 収録装置一式を含めて約 20 kg) を使用し、機器の破損等も全く生じなかった。野外での作業をなるべく少なくするため、旅行出発前に地学棟でバッテリー結線をあらかじめ行い、現場では地震計の設置作業のみとなるよう配慮した。サンプリング周波数は、すべて 50 Hz とした。

JARE-39 夏期間のヘリコプター・オペレーション、ならびに「しらせ」の復路アムンゼン湾での調査オペレーションにおいても、それぞれ短期間ではあるが観測を行った。

以下に、観測を行った各露岩の観測期間を、設置した順番に示す。また図 10 には、スカルプスネス/きざはし浜、スカルプスネス/オーセン東、およびスカーレン/大池西の各観測点に設置した短周期地震計で捉えた South of Fiji Islands の地震 [(Mb=6.7) October 14, 1998] の波形を示す。スカルプスネス/オーセン東 (97100504.cdm04) 記録の後半部分には、観測点付近のタイドクラックによる振動と思われるノイズが混入しているものの、3 観測点ともに波形解析には十分な S/N を有している。

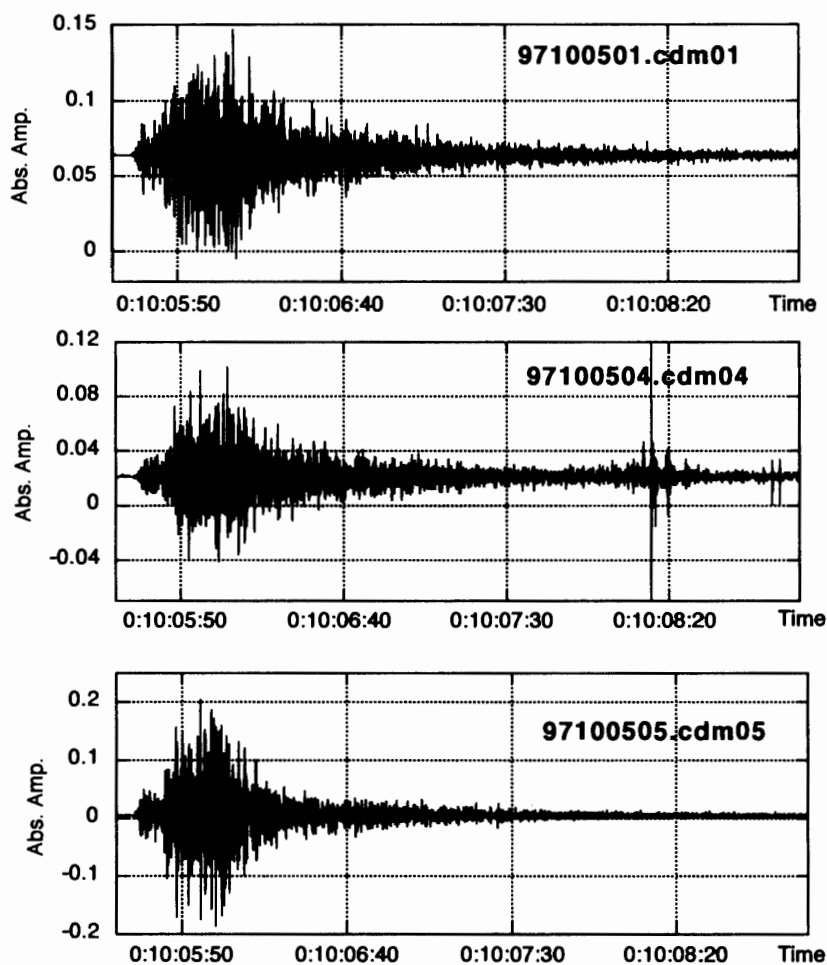


図 10 スカルブスネス/きざはし浜, オーセン東, およびスカーレン/大池西の短周期地震計で捉えた South of Fiji Islands の地震

Fig. 10. Digital waveforms of temporary observations using short period seismographs on outcrops for the South of Fiji Islands Earthquake ($M_b=6.7$) on October 14, 1998. From the upper traces to the lower: Skarvsnes/Kizahasi Beach (97100501.cdm01; L22D-UD), Skarvsnes/East Osen (97100504.cdm04; L22D-UD), Skallen/West Lake Oike (97100505.cdm05; L22D-UD).

〔設置露岩/場所〕	〔設置期間〕	〔緯度(S)〕	〔経度(E)〕	〔LS8000SH No.〕
とっつき岬	1997. 07. 15-1997. 07. 17,	68°54.6′	38°49.8′	1
	1997. 07. 20-1997. 07. 22,			4, 5
	1997. 08. 01-1997. 08. 03,			1
	1997. 08. 05-1997. 08. 06,			4
	1997. 08. 05-1997. 08. 07,			2
	1997. 08. 06-1997. 08. 08,			5
	1997. 08. 12-1997. 08. 13,			5
	1997. 08. 13-1997. 08. 14,			4
	1997. 09. 02-1997. 09. 07			5
向岩	1997. 11. 14-1997. 11. 16	69°02.0′	39°42.1′	1, 5

ルンパ	1997. 11. 03-1997. 11. 06, 69°08.7' 39°24.3'	5
	1997. 11. 22-1997. 11. 24	5
ラングホブデ/雪鳥沢	1997. 08. 03-1997. 08. 08, 69°14.6' 39°42.8'	4
	1997. 09. 10-1997. 09. 11,	5
	1997. 11. 22-1997. 11. 24,	1
	1997. 12. 19-1997. 12. 21,	1
	1998. 01. 29-1998. 01. 31	1
ラングホブデ/袋浦北	1997. 11. 22-1998. 11. 24, 69°11.4' 39°38.4'	2
	1997. 12. 18-1997. 12. 19	1
ラングホブデ/ハムネナッペン	1997. 11. 23-1998. 11. 24 69°16.8' 39°40.9'	4
スカルブスネス/きざはし浜	1997. 10. 11-1997. 10. 15, 69°28.4' 39°36.3'	1
	1997. 12. 22-1997. 12. 24,	1
	1998. 02. 02-1998. 02. 04	5
スカルブスネス/オーセン東	1997. 10. 11-1997. 10. 15 69°27.6' 39°42.7'	4
スカルブスネス/舟底池	1997. 11. 03-1997. 11. 05 69°26.4' 39°33.0'	1
スカルブスネス/ラングボレン東	1997. 11. 03-1997. 11. 05 69°26.3' 39°37.4'	4
スカーレン/おしあげ浜西	1996. 10. 12-1998. 10. 15 69°38.8' 39°26.9'	2
スカーレン/大池西	1997. 10. 12-1998. 10. 15, 69°40.4' 39°24.5'	5
	1997. 11. 03-1998. 11. 05,	2
	1997. 12. 21-1997. 12. 22,	1
	1998. 02. 04-1998. 02. 05	5
トナー島/A	1998. 02. 20-1998. 02. 20 67°05.3' 50°15.4'	1
トナー島/B1	1998. 02. 22-1998. 02. 22 67°06.7' 50°21.6'	1

3.3. ボーリング装置の掘削試験

将来の人工地震による地殻構造探査において、大陸氷床上での発破孔掘削のためにスチーム式ボーリング装置 (SD-15000) を開発し (図 11), JARE-38 越冬中に昭和基地周辺および、みずほ高原での浅層掘削試験を計 4 回行った。

スチーム式ボーリング装置の原理は、以下の通りである。造水機 (スノー・メルター) に周辺の雪を入れ溶かした湯を、給水ポンプを通じてスチーム・ジェネレーターに送る。スチーム・ジェネレーターで水蒸気を発生させ、50 m 長のゴムホースを通じて掘削ノズルより水蒸気を雪面に向けて放出する。その潜熱を主とした水蒸気の保有熱で、雪氷を溶かしながら孔を鉛直方向に掘り下げていく。本装置は、雪氷コアを採取しない開孔掘削方式である。掘削ノズル部分には、金属製の専用スカート (径 140 mmφ, および 160 mmφ の 2 種類を用意) が取り付けられ、約 200 mm のほぼ均等な径の掘削孔を掘ることができる。掘削ノズル部分は、専用の三脚により固定され、自動繰り出し装置により、一定速度 (掘削中は、5-10 m/時に設定) でホースを順次送ることができる。また電気操作盤により、スチーム・ジェネレーターのガス・バーナーの点火、ボイラー内水量の自動検知により給水ポンプの動作制御を行うことができる。造水機・ジェネレーターの運転用燃料としては、(白) 灯油を使用する。以上の基本的な仕様は、JARE-28 においてあすか観測拠点で実施した、排水孔用のスチーム式

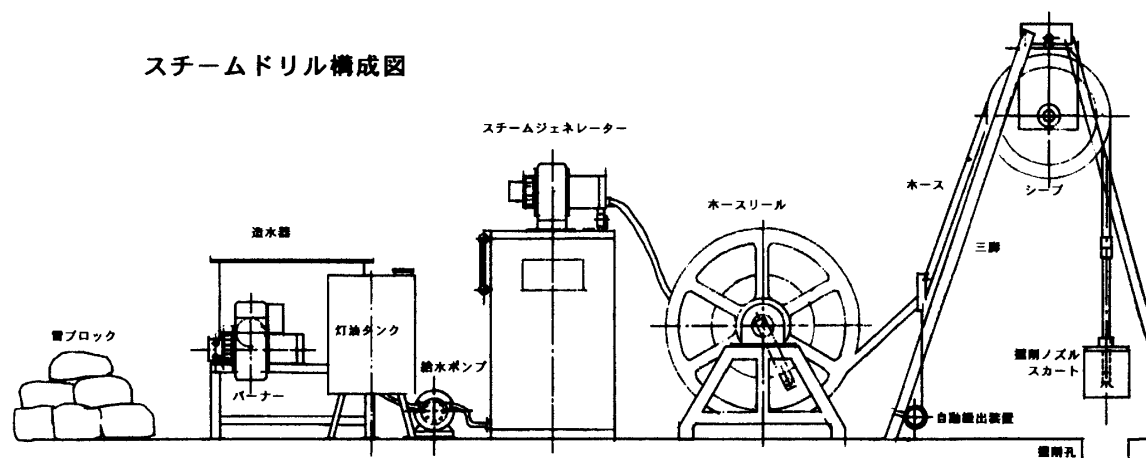


図 11 スチーム式ボーリング装置の構成

Fig. 11. Schematic illustration of the steam water ejective-type ice/snow-drilling system.

ドリル（石沢ら，1990）とほぼ同じである。

掘削中は，造水機への雪入れ，ジェネレーター内の水面の高さおよび蒸気圧の確認，ならびにホースの送り出し操作などの作業で，最低で2名は必要である。実際の掘削時には，4名程度で木杵からの開梱・組立を行い，掘削が軌道にのれば，2名程度で交代して作業にあたった。しかし，現段階の仕様では，開梱・組立作業にかなりの手間を要するため，今後は簡単に蓋を開けられるような箱に詰め替えるか，直接そりに固定して積む方法が望ましい。

第1回の掘削は1997年5月に実施した。5月3日に地学棟周辺でボーリング装置の組立の練習・試運転を行い，正常に動作することを確認した。5月10日には，大陸ルートの前進拠点であるS16において，最大ホース長の50 mまでの氷床掘削を行った（1200 LTの気温 -15.2°C ，風速 5.2 m/s ，天気晴れ）。しかし，ホース先端のノズルとスカートが孔内部で凍結し，回収が不可能になったため，引き上げ時にやむなくホースを30 m長で切断した。その後は，予備のノズルとスカートを用いて行った。

2回目の掘削は，8月22日に再度S16で行った（1400 LTの気温 -21.2°C ，風速 10.0 m/s ，天気快晴地吹雪を伴う）。低温のため第1回よりも掘削速度は低下したものの，ホース長の限界に近い25 m深まで順調に実施した。さらに塩化ビニール管（4 m長 \times 4本，140 mm ϕ 外径）によるケーシング・テストも行った。また，保温対策として，造水機や給水ポンプの側面に毛布や布団を巻いたので，造水効率が前回よりも上昇した。造水機の上面もベニヤ板で完全に蓋をして保温に努めた。

その後，第3回として，9月中旬～下旬にみずほルートでの固体地球物理・雪氷観測旅行において，9月20日にみずほ基地で試験を行った（0810 LTの気温 -47.7°C ，風速 8.0 m/s ，天気快晴）。しかし，基地までの運搬中にその振動と低温のため，スチームジェネレーターの高電圧，送風部分の接続ボルトが脱落し，送風ターボファン本体がはずれた。そのため，



図 12 向岩でのボーリング装置の実験風景 (1997 年 11 月)

Fig. 12. Drilling operations by the steam drilling system at Mukaiiwa Rocks in November 1997.

それらに接続されている点火トランス等の電気配線の一部が破損した。現地で修理を行ったが、造水機を動かしたのみで、結局掘削するまでには至らなかった。

さらに 11 月 18 日に、図 12 に示す向岩の青氷帯において 4 回目を実施し、4 m 深まで掘削することができた (1200 LT の気温 -2.4°C 、風速 3.4 m/s 、天気曇り)。当初ジェネレーターのバーナーが点火しなかったが、点火感知装置 (フレイム・アイ) の故障であることが判明し、電気接続を変更した後は、正常に運転を開始した。青氷帯のため熱効率は悪く、孔周囲の氷の融解により掘削孔径が 330 mm 程度にまで広がった。今後は湧水とその凍結防止のために、孔内への排水ポンプの利用が大変有効であろう。また気温が高いため、保温対策は全く施さなかった。

図 13 に、5 月、8 月、11 月時における掘削深度とジェネレーター蒸気圧の時間変化を示した。ジェネレーター蒸気圧については、掘削中の通常値としてゲージ圧力にて $2.5\text{--}3.5\text{ (kg/cm}^2\text{)}$ であった。ホース長の増加と共に徐々に圧力が減少していることが分かる。国内での試験では、 $4.0\text{--}5.0\text{ (kg/cm}^2\text{)}$ であったが、低温のためジェネレーターの威力が低下していると思われる。この蒸気圧の低下により、掘削速度や坑内への浸水にも影響がある。南極で使う場合、掘削効率を上げるにはジェネレーターの容量をもう少し大きくする必要がある。燃料の消費量については、気温等の気象条件に大きく左右され、 $8\text{--}16\text{ l/時}$ 程度の範囲である。また、造水機の実能力の目安としての、消費した雪の量は、S16 で $0.05\text{--}0.06\text{ m}^3/\text{時}$ 程度、向岩の青氷帯で $0.1\text{ m}^3/\text{時}$ 程度であった。

また、問題点として装置内の凍結がある。一度運転すると、給水ポンプや接続用ホースなど各所に水が溜まり、それを放置すれば凍結してしまい、次回立ち上げ時に労を要する。越冬中の寒い時期が多かったためでもあるので、実際に人工地震を行う夏期間では影響は少ないと思われる。

越冬期間中の内陸旅行時における移動は、器材一式を 2 トンそりに詰め込みラッシングを

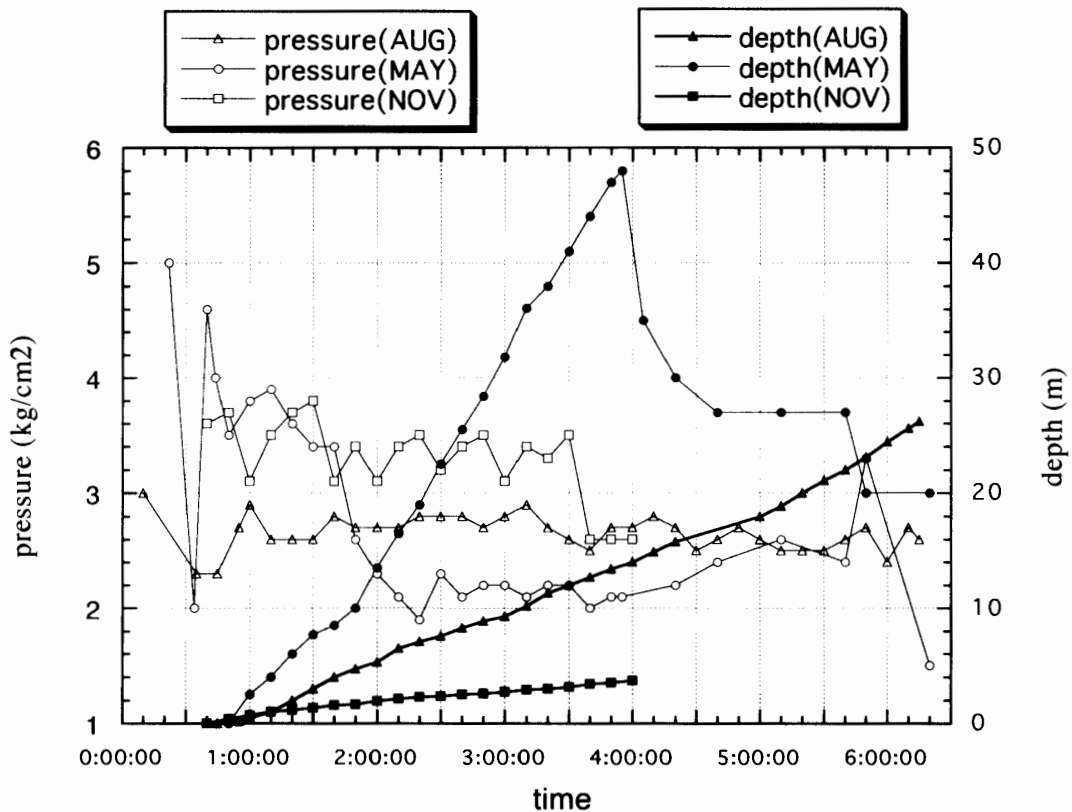


図 13 掘削深度とスチーム・ジェネレーター蒸気圧の時間経過

Fig. 13. Relationship between generator steam pressure and drilled depth from the time of beginning of drill system installation.

行い、雪上車でけん引して移動した。また、極夜の時期に、破損したホース先端部分の修理を、航空隊員の支援により仮作業棟で行った。また、みずほ旅行時の破損箇所については、メーカー（地球工学研究所）と適宜連絡交換をして、11月初旬に地学棟で修理した。なお、越冬開始後3カ月間、および持ち帰り輸送前の時期については、それぞれ地学棟前、およびAヘリポート周辺に同器材の木箱一式をデポした。本装置は各部品が独立した梱包状態のため、組立に手間を要するので今後改善する必要がある。

3.4. 投下式地震計の無線試験

将来の人工地震による地殻構造探査において、大陸氷床上に地震計を設置する場合、地上展開ができない場所（クレバス、氷河、等）へ、ヘリコプターにより投下する地震計（ペネトレーター; expendable ground system segment (GSS))の開発が、これまで南極での投下実験を含めて進められてきた（渋谷ら, 1991, 1992）

JARE-38では、その開発段階の一環として、GSS 1台（2号機）を持ち込み、越冬後半を中心に幾つかの試験を行った。特に、パソコンに付属したデータ収録無線機（ADCS）により、

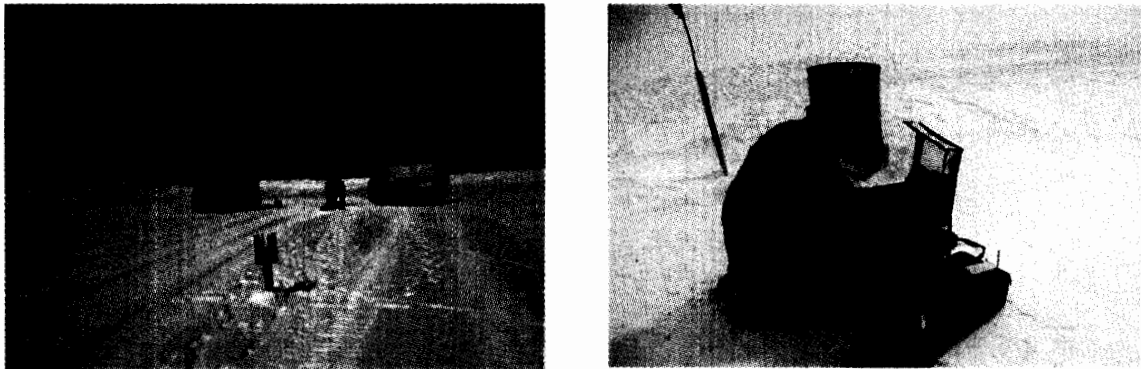


図 14 投下式地震計（ペネトレーター）の無線試験

Fig. 14. Test measurements of radio emission distance for the expendable ground system segment (GSS) in the Langhovde region in November 1997. GSS and snow vehicles (left); ADCS and the personal computer (right).

データ回収のためのコマンド命令の到達距離を調べた。また、GSS 動作期間中の電圧寿命の測定試験を行った。データ回収等のコマンド命令は、専用パソコンからシリアルポート (RS-232) に接続されたモデム (STR-1200) により、伝送速度 9600BPS で GSS 本体に送信され、逆に GSS からはバッテリーの電圧と地震計のデータを受信する。

1997 年 11 月中旬に、昭和基地の地学棟及び北の浦の海水滑走路で、11 月下旬にはラングホブデ/ハムナ (図 14) において、それぞれ 100m 以内の近距離で実施した。その後、12 月上旬に再度地学棟付近で試験を行った。まとめると以下のような結果を得た。

1) 内蔵リチウムバッテリー (6V 30AH)

電源を ON、送信待ちの状態で作動させていると消耗が激しい。定格の 10 日はもたないが、実質として約 4.85 日 (116.5H) 持つことが分かった。図 15 左に、1997 年 11 月 13 日の約 1700 分 (28.3H) 分の電圧データの変動を示す。1700 分で電源を一度 OFF にしていることを示す。

2) サイクロン電池

リチウムバッテリーの代用として 6V 5AH のもの (3.5 章) を試験的に使用したが、24 時間以内で電圧低下し作動しなくなった。

3) データ吸い上げ時間

パソコンからの地震・電圧データの吸い上げに約 7, 8 分を要した。これは、ほぼ定格通りである。

4) 通信距離

GSS を地上 (雪面上) に、ADCS を 2m 高度に置いた状態で試験すると、70m 以上届くことを確認した。それ以下の ADCS の高度の場合には、到達距離は半減した。この原因として、ひとつは地上 (雪面) による電波の乱反射が考えられる。また、ADCS のアンテナ特性

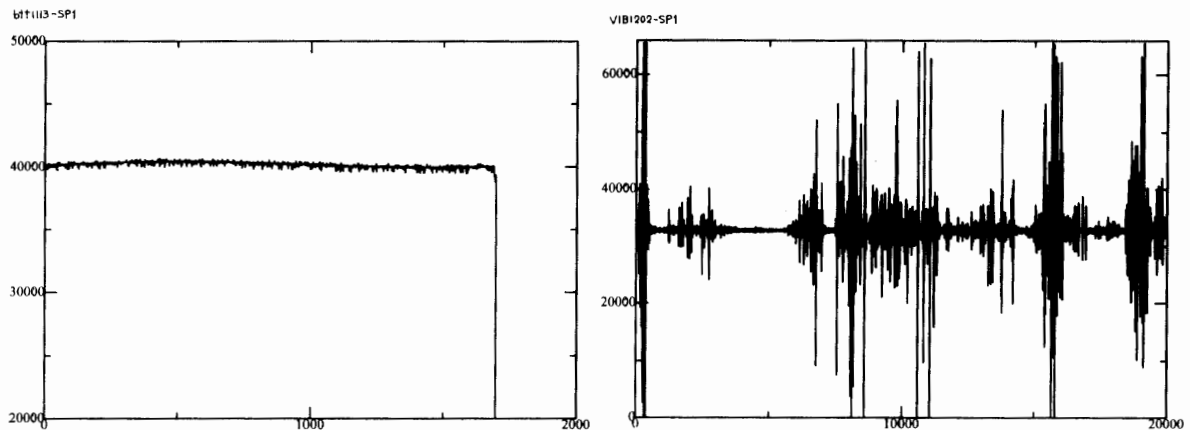


図 15 ペネトレーターの電圧降下状況（左: 縦軸は $0 \sim 65535 = 10 \text{ V}$, 横軸は $1 \text{ point} = 1 \text{ min}$), 波形データ（右: 縦軸は $0 \sim -15 \text{ V} \sim 65535 = +15 \text{ V}$, 横軸は $1 \text{ point} = 1/200 \text{ s}$ ）

Fig. 15. The penetrator voltage decrease (left) and digital waveform data of the expendable ground system segment (GSS; right).

が、ヘリコプターからの真上からのコマンド送信を想定しているため、地上方向（水平方向）にはあまり強くないことが考えられる。

すでに国内（北海道青山牧場）で行った小型ヘリコプターによる投下実験では、ヘリコプターの位置が 100 m の高度で、約 300 m 程度まで水平距離として届くことが分かっている。従って、送信距離については、地上での試験であったことを考慮すると、極域環境下でもほぼ定格通りであるといえる。

5) 地震動データ

記録時間が短いため、自然地震波形は捉えられていないが、図 15 右に 1997 年 12 月 2 日のテスト収録時の地震動（人工ノイズの混入有り）波形の例を示す。なお、JARE-38 と前後して 1997 年度、1998 年度の爆破地震動研究グループ（代表者: 吉井敏尅）による実験においても、開発中の同型 GSS でテスト収録が試みられており、人工地震波形をきれいに記録している。

6) 消費電力

将来の探査実験（夏期間中に最大約 50 日間）を考慮すると、現状で約 180 mA の消費電力を、1 桁程度下げる必要がある。今後の開発予定としては、実機の消費電力をさらに $1/6$ 程度まで落とすことが技術的に可能であり、また電池の容量を 1.2 倍に増やすため電池の寿命は約 35 日程度までは延びると予想される。

3.5. 長寿命電池の電圧降下試験

地殻構造探査用の地震波形収録装置電源として、JARE-38 越冬中の氷床上でのアレイ観測（3.1 章）や沿岸露岩域での機動観測（3.2 章）において、サイクロン電池（ $6 \text{ V } 25 \text{ AH}$, $6 \text{ V } 5$

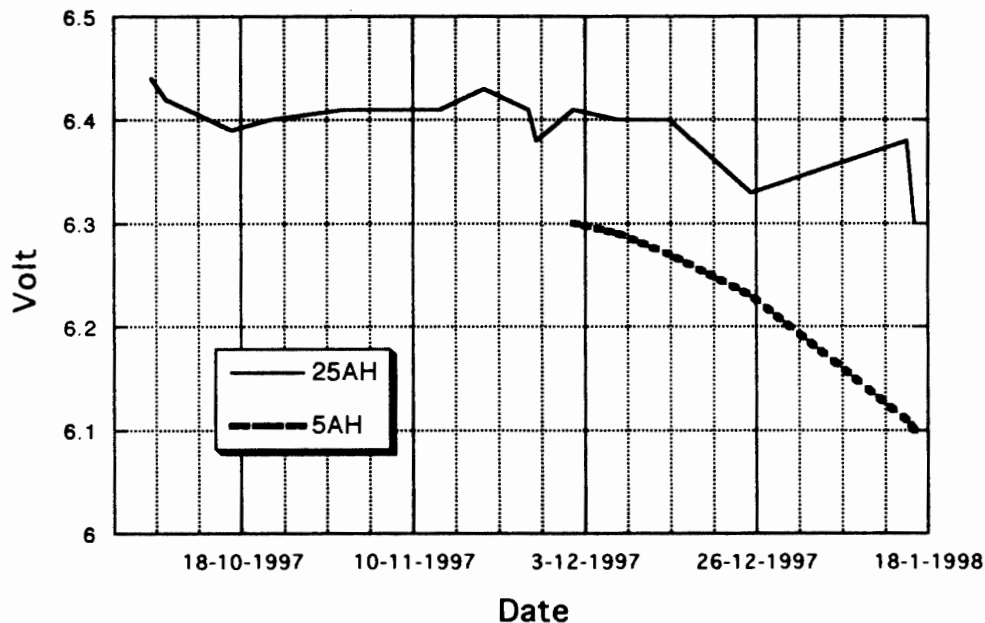


図 16 サイクロン電池の電圧降下の経過

Fig. 16. Voltage decrease of the long term cyclon batteries during a period of about 100 days. Solid line: 25AH; dashed line: 5AH.

AH) を使用してきた。サイクロン電池は、従来の小型シール鉛蓄電池に比べて、独自の螺旋状の電極構造を採用し、乾式電解液方式により、低温での放電特性がよく長寿命となっている。また機械的強度に優れており、再充電せずに長期間保存できるなど、南極での野外調査の目的に十分適うと考えられる。これまでも JARE-36 で一部試験が行われている（田中・金尾, 1996）。

この電池の長寿命特性を調べるために、1997 年 10 月～1998 年 1 月に昭和基地・地学棟下において、長期間に渡り連続観測することで電池電圧の降下量を調べた。その経過の結果を図 16 に示した。

収録装置と地震計等は、データーロガー（LS8000SH）と短周期地震計（L22D）を組み合わせたもので、上記（3.1 および 3.2 章）で使用したものと全く同一である。1 回の設定当たり最大 50 日間分が収録できるため、1 日当りの収録時間を約 200 秒間、サンプリング周波数を 50 Hz とした。6 V 25 AH については、50 日間×2 セットの計 100 日間、6 V 5 AH については 50 日間のみ連続観測を行った。観測期間及び電圧降下量をまとめると以下の通りである。途中天候（おそらく外気温）の変化により電圧の変動が多少あったが、夏期間のみずほ高原やアムンゼン湾等での 2 カ月程度の観測であれば、25 AH 相当以上のものを用いれば一度も交換する必要はないと思われる。

[電池型式]	[設置期間]	[開始時電圧]	[終了時電圧]	[収録装置 No.]
6 V 25 AH	1997. 10. 06-1998. 01. 17	6.44	6.30	3
6 V 5 AH	1997. 12. 02-1998. 01. 17	6.30	6.10	2

4. 沿岸露岩域・内陸旅行における GPS 観測・重力測定

4.1. GPS 観測

トリンブル 4000SST 受信機 2 台を用いた GPS 干渉測位は、とっつき岬、西オングル島および内陸ルート上において行った。特に内陸においては、9 月に行われた「みずほルート地学調査旅行」および 10 月から 11 月にかけての「ドームふじ観測拠点補給旅行」において、ルート上の新たな GPS ポイントで観測を実施することができた。

観測は、いずれも測定間隔 30 秒、最小衛星数 4 個、受信衛星高度 15 度以上の設定条件で、12 時間連続観測を実施した。今回の観測は干渉測位のため、昭和基地の SCAR GPS 基準点 (WGS84 系での座標 ; $69^{\circ}00'24.7''\text{S}$, $39^{\circ}35'06.3''\text{E}$, 38.771 m ; Kanao *et al.*, 1995) においても、できる限り同時時間帯に同じ設定で連続観測を実施した。

JARE-38 で実施した観測点は、露岩域では、とっつき岬三角点、昭和基地の天測点、SCAR GPS 基準点および地学棟横の ERS 地上局アンテナ (PRARE GROUND STATION) 設置点であり、内陸ルート上においては、S16, H15, H260, みずほ基地 (2 点), D240, D364 および DF80 の各観測点である。これらのデータは、地殻変動や氷床変動の基礎データになると考えられる。最近では特に S16 において、夏期間を中心に GPS 観測により氷床の変動量が求められている (Ootaki and Fujiwara, 1998; 岩田ら, 1998)。それによると、西北西方向に年間約 5 m 程度移動していること、および年間 15 cm 程度の鉛直成分の下降変動の存在が確認されている。

ここでは内陸氷床上の各観測点の状況と予備的な結果について、東ら (1998) に報告されている段階の値を示す。沿岸露岩を含めた JARE-38 データの詳しい解析は今後に行われる。

S16

8/21 1500 (UT) ~12 hour, ルート赤旗より南 5 m 地点の赤白エスロンポール上で測定した。初期解析結果は、 $69^{\circ}01'46.503''\text{S}$, $40^{\circ}03'07.410''\text{E}$ 。

H15

9/25 1500 (UT) ~12 hour, ルート赤旗より S16 側に 10 m のところに赤白エスロンポール (雪面からの高さ 81 cm) を新たに立て測量した。初期解析結果は、 $69^{\circ}04'50.531''\text{S}$, $40^{\circ}46'33.887''\text{E}$ 。

H260

9/23 1600 (UT) ~12 hour, ルート風下側の赤旗 2 本に挟まれた赤白エスロンポール上で

測定した。初期解析結果は、 $69^{\circ}52'35.524''\text{S}$, $42^{\circ}41'23.405''\text{E}$ 。

みずほ基地（2 点）

9/20 1800 (UT) ~12 hour, 基地の看板東側, 約 50 m 地点の金属ポール (高さ 149.5 cm) で測定した。10 m 手前に JMR 用の金属ポール (高さ 45.0 cm) あり, 149.5 cm ポールから 45.0 cm ポールまでは, 距離 10 m 磁方位 350 度である。しかし, 衛星の受信状況が悪く, 初期解析結果を得るに至っていない。

11/14 0900 (UT) ~12 hour, 上記 45.0 cm ポール上で測定した。初期解析結果は, $44^{\circ}17'15.747''\text{S}$, $70^{\circ}42'00.439''\text{E}$ 。

MD240

11/9 1800 (UT) ~12 hour, ルート赤旗脇のエスロンポール上で測定した。しかし, 衛星の受信状況が悪く, 初期解析結果を得るに至っていない。

MD364

10/21 1500 (UT) ~12 hour, ルート赤旗脇のエスロンポール上で測定した。初期解析結果は, $74^{\circ}00'28.574''\text{S}$, $42^{\circ}59'47.750''\text{E}$ 。

DF80

10/31 0900 (UT) ~12 hour, ルート赤旗脇のエスロンポール上で測定した。初期解析結果は, $77^{\circ}22'23.676''\text{S}$, $39^{\circ}36'50.820''\text{E}$ 。

4.2. 沿岸露岩域における重力測定

ラコスト重力計を用いた重力測定は, リュツォ・ホルム湾周辺の沿岸露岩域やオングル諸島および内陸ルート上において行われた。これまでにルンドボックスヘッタ等での露岩で重力が測定されている (福田, 1986) が, 地下構造を推定するためにも, 周辺域の重力異常図の作成のためにも重力測定データの蓄積は重要である。JARE-38 の結果もリュツォ・ホルム湾周辺の面的な構造を探る上で, 貴重な資料として追加されることになる。

リュツォ・ホルム湾周辺の沿岸露岩域では, 国土地理院の設置した三角点や水準点を中心に, 調査旅行中に適宜実施した。ラコスト重力計は, 主に G-515 型を用い, とつつき岬, 向岩, ラングホブデ, スカルブスネス, スカーレン, ストランニッパ, ルンパ島, 弁天島, オングルカルベン, 西オングル島, 東オングル島, おんどり島, および岩島において計 89 回, 51 地点において測定を行った。また越冬始めの 3 月に, 昭和基地内重力基準点の精密測定を実施した。

また JARE-39 夏期間にも, スカーレン, スカルブスネス, ラングホブデにて JARE-39 隊員と引き継ぎを兼ねて重力測定を実施した (G-196, G-805 を使用)。さらに, 「しらせ」の往復路におけるアムンゼン湾調査時においても, リーセル・ラルセン山, およびトナー島の基準点測量をそれぞれ 2, 4 箇所で行った。

表 1 沿岸露岩域における重力測定結果

Table 1. Location of gravity surveyed stations, free-air and Bouguer anomalies and bedrock elevations for outcrops around the Sôya Coast region.

STATION NAME	LATITUDE degree	LONGITUDE degree	HEIGHT meter	DIFFERENCE mgal	GRAVITY mgal	FREE-AIR mgal	BOUGUER mgal
(昭和基地基準点) S/S_IAGBN_A1	-69.007	39.585	21.49	0.000	982524.327	-9.34	-14.79
(とつつき岬) TOT_GSI.13	-68.912	39.828	15.31	-2.744	982521.583	-16.60	-18.31
TOT_J38	-68.912	39.828	5.31	-0.430	982523.897	-17.37	-17.96
(向 岩) MKI_rock	-69.033	39.702	26.03	-3.351	982520.976	-21.30	-24.21
(東オングル島) E-ONG_43.4	-69.010	39.587	43.42	-7.111	982517.216	-18.28	-23.14
E-ONG_33.3	-69.015	39.568	33.34	-2.340	982521.987	-16.92	-20.65
E-ONG_35.4	-69.018	39.593	35.38	-4.774	982519.553	-18.93	-22.89
E-ONG_40.7	-69.012	39.608	40.70	-6.659	982517.668	-18.76	-23.32
E-ONG_41.2	-69.007	39.613	41.20	-7.880	982516.447	-19.53	-24.14
(西オングル島) W-ONG_36.6	-69.018	39.498	36.56	1.010	982525.337	-12.78	-16.87
W-ONG_37.9	-69.017	39.543	37.92	-2.131	982522.196	-15.40	-19.64
W-ONG_42.3	-69.022	39.518	42.34	-3.220	982521.107	-15.43	-20.17
W-ONG_47.7	-69.028	39.527	47.69	0.483	982524.810	-10.48	-15.82
W-ONG_22.8	-69.032	39.508	22.76	2.611	982526.938	-16.24	-18.79
W-ONG_43.1	-69.038	39.537	43.14	-1.799	982522.528	-14.77	-19.60
W-ONG_33.4	-69.033	39.567	33.39	-0.824	982523.503	-16.50	-20.24
W-ONG_42.2	-69.027	39.553	42.16	-4.280	982520.047	-16.84	-21.56
W-ONG_40.7	-69.027	39.582	40.65	-2.632	982521.695	-15.66	-20.21
(おんどり島) ONDORI_IS	-68.998	39.537	15.81	0.665	982524.992	-18.31	-20.08
(オングルカルベン) ONG_KLV	-69.022	39.442	35.51	-0.726	982523.601	-15.04	-19.01
(弁天島) BENTN_IS	-69.042	39.253	23.32	2.294	982526.621	-16.99	-19.60
(ルンバ) RMP_GSI.108	-69.145	39.405	46.22	-4.572	982519.755	-23.05	-28.22
(ラングホブデ) LNG_J38	-69.190	39.640	20.00	6.410	982530.737	-22.87	-25.11
LNG_230.6	-69.287	39.708	230.64	-37.394	982486.933	-7.51	-33.33
LNG_189.7	-69.198	39.687	189.72	-26.253	982498.074	-3.68	-24.92
LNG_39-03	-69.243	39.713	6.98	11.239	982535.566	-25.28	-26.06
LNG_37-02	-69.243	39.718	27.88	6.432	982530.759	-23.63	-26.76
LNG_37-01	-69.235	39.780	276.33	-43.531	982480.796	3.55	-27.38
LNG_353.0	-69.225	39.760	352.98	-64.993	982459.334	6.34	-33.17
(スカルプスネス) SKV_GSI.140	-69.462	39.652	13.38	20.684	982545.011	-26.94	-28.44
SKV_GSI.110	-69.473	39.587	217.02	-22.690	982501.637	-8.19	-32.48
SKV_34-00	-69.477	39.662	54.48	12.991	982537.318	-22.85	-28.95
SKV_131.3	-69.448	39.618	131.26	-2.679	982521.648	-13.14	-27.83
SKV_39-01	-69.473	39.607	9.05	21.280	982545.607	-28.38	-29.39
SKV_39-02	-69.473	39.605	2.61	22.516	982546.843	-29.13	-29.42
SKV_39-04	-69.442	39.558	66.67	10.854	982535.181	-19.14	-26.60
SKV_39-07	-69.493	39.565	32.00	15.281	982539.608	-28.49	-32.07
SKV_GSI.134	-69.430	39.603	400.35	-78.559	982445.768	-4.91	-49.72

(スカーレン)

SKL_TENSOKU	-69.672	39.407	41.22	24.698	982549.025	-26.82	-31.43
SKL_37-09	-69.668	39.422	34.55	28.452	982552.779	-24.92	-28.79
SKL_78.1	-69.663	39.417	78.09	18.899	982543.226	-20.75	-29.49
SKL_GSI.112	-69.650	39.403	186.20	-9.298	982515.029	-14.80	-35.64
SKL_GSI.148	-69.663	39.385	62.00	20.540	982544.867	-24.07	-31.01
SKL_5.9	-69.673	39.408	5.90	31.520	982555.847	-30.99	-31.65
SKL_GSI.109	-69.677	39.450	128.09	8.684	982533.011	-16.33	-30.66
SKL_38-05	-69.678	39.483	142.45	2.791	982527.118	-17.89	-33.83
SKL_34-06	-69.647	39.448	108.61	7.725	982532.052	-21.52	-33.68
SKL_33.2	-69.655	39.467	33.22	24.728	982549.055	-28.27	-31.99

(アムンゼン湾リーセルラルセン)

RIISER-A	-66.758	50.683	37.25	-99.054	982425.273	30.45	26.28
RIISER-B	-66.758	50.692	61.88	-103.782	982420.545	33.32	26.40

(アムンゼン湾トナー島)

TON_39-08	-67.088	50.257	13.20	-79.830	982444.497	20.65	19.17
TON_39-09	-67.100	50.257	45.90	-87.802	982436.525	22.01	16.87
TON_39-10	-67.080	50.275	39.00	-98.898	982425.429	10.09	5.72
TON_39-11	-67.112	50.360	11.42	-85.473	982438.854	12.94	11.66

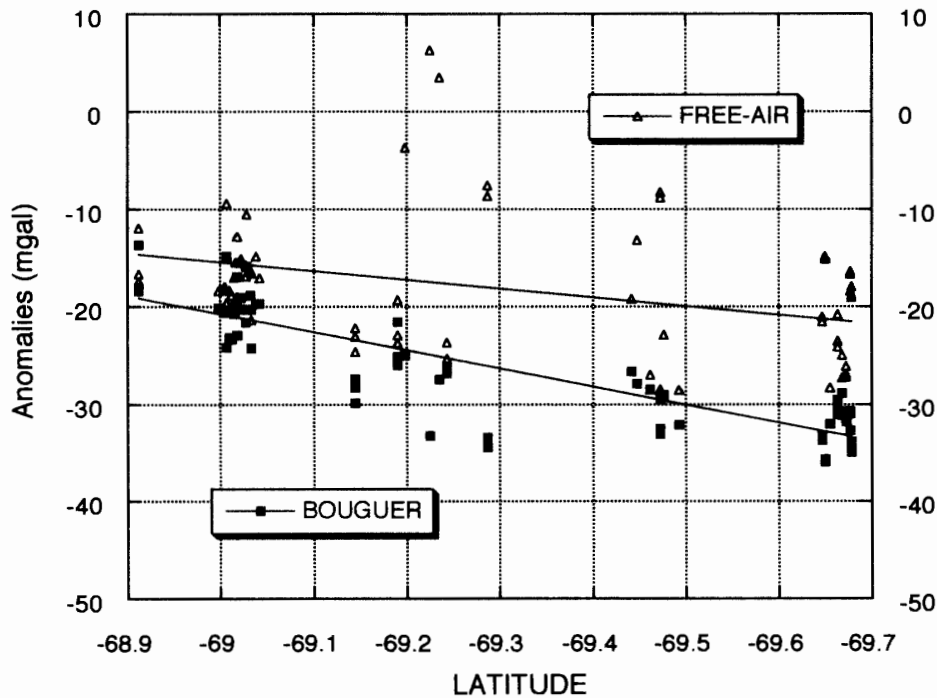


図 17 宗谷海岸露岩域における重力測定結果 (フリーエア異常と単純ブーゲ異常)

Fig. 17. Free-air (open triangles) and Bouguer (solid squares) gravity anomalies along outcrops around the Sôya Coast region (plotted against latitude).

表 1 に G-515 による沿岸露岩域の各測定点におけるフリーエア異常, ブーゲ異常等の結果を示す. 重力異常値の計算は, 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. 重力基準点としては, 昭和基地重力計室内の IAGBN 基準点 ($g=982524.327$ mgal; Yamamoto, 1996) を用い, 重力計のドリフトとテアー

の補正を行ったのは神山ら（1994）による方法と全く同一である。なお、高さはすべて海拔高度に変換したものをを用いている。図 17 には、宗谷海岸の露岩域におけるフリーエア異常と単純ブーゲ異常について、緯度の関数としてプロットしたものを示す。これまでに測定されてきた一般的な傾向として、この地域のブーゲ異常はしらせ氷河に向かって南へいくほど小さくなることが知られているが、今回の測定結果もその傾向と矛盾しない。宗谷海岸の南部へいくに従って、モホ面がより深いことが示唆される。

4.3. 内陸旅行における重力測定

みずほ基地およびドームふじ観測拠点への内陸旅行が行われた際に、ルート上において重力測定を実施した。特に、これまで重力データの少ないみずほ基地からドームふじ観測拠点間の測定データは、南極氷床の内陸部の地下構造の推定にとって重要である。これまで過去の内陸旅行でも大陸氷床上の重力測定が繰り返さされており（例えば、Nishio *et al.*, 1988）、特に JARE-33 ではドームふじ観測拠点までの重力測定もすでに一部で行われており（神山ら, 1994）、モホ面の深さ分布をブーゲ異常と絡めてドーム域まで拡張する試みもなされている（Kanao *et al.*, 1994）。

10 月から 11 月にかけて行われたドームふじ観測拠点補給旅行における重力測定についての概要は以下のとおりである。重力測定は、ラコスト重力計 G-680 を用いて、1 日 2-4 点行ったが、旅行日程を考慮して、主に、昼食時および気象観測時に実施するように努めた。測定点は、これまで測定データの少ないみずほ基地からドームふじ観測拠点間を重点的に、10-20 km ごとに総数 67 点で実施した。また、測定精度を高めるため、帰路においては、できるだけ、再測定を行うようにした。雪上車搭載のインバーターにより、夜間、雪上車の運転を停止するとき以外は常に充電を行い、また、予備のバッテリー、充電器を用いること等により、旅行期間中、重力計の恒温槽の温度を低下させる事はなかった。測定点は、かつて実施されたアイスレーダーなどのデータを用いるため、2 km 間隔で設置されているルート標識の赤旗（雪尺用）またはドラム横で測定を行った。測定中は、振動を避けるため、10 m 以上雪上車を離すとともに、数 100 m 以内での雪上車の移動は一時中断した。ドームふじ観測拠点南方の DF80 が今回の重力測定で最も南に位置する測定点である。

9 月に行われたみずほ基地までの地学調査旅行でも同様に、往復路の停泊時と昼食時を中心に計 23 地点、28 回を実施した。特に H ルートの途中（H96-H120）では、地震計のアレイ観測も同時に行っていたため、2 km 間隔で密に測定した。ラコスト重力計は G-515 を用いたが、電源はドームふじ補給旅行時と同じく、雪上車搭載のインバーターにより常時充電し、旅行期間中に重力計温度を低下させる事はなかった。

12 月から 1998 年 2 月にかけて行われた JARE-39 ドーム夏旅行時においては、同行した航空河端隊員に依頼して、ラコスト重力計（G-515）にて往復路で合計 43 回測定を実施した。

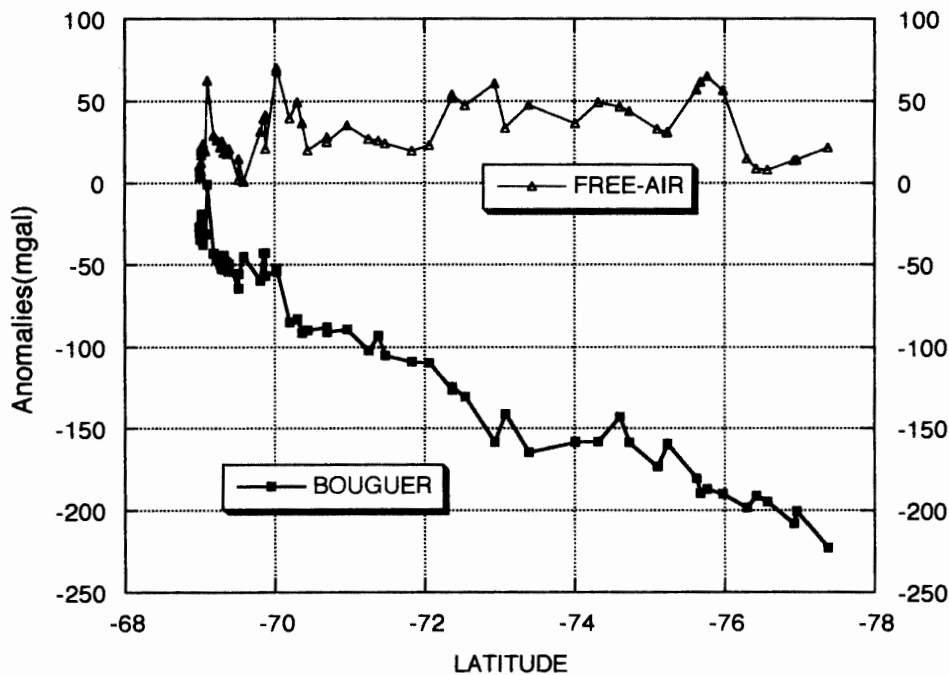


図 18 内陸ルートにおける重力測定結果（フリーエア異常と単純ブーゲ異常）

Fig. 18. Free-air (open triangles) and Bouguer (solid squares) gravity anomalies for the inland ice sheet from the S16 area to Dome Fuji Station (plotted against latitude).

上記旅行時と同様に、基本的に毎日昼食時及び停泊地の 2 点で行った。しかし雪上車の振動等で重力計の感度に変化し、測定時のガルバーの目盛り合わせに手間取り、場所によっては測定不能の場所もあった。しかし本旅行時の測定により、S16 からドーム基地までの貴重なデータがさらに追加された。

また 10 月下旬には、地震学的構造との比較を得るために、とつつき岬-S16 ルート上の短周期地震計アレイ観測点（3.1 章）での測定を計 12 箇所で行った。

表 2 に G-515 を用いた内陸域の各測定点におけるフリーエア異常、ブーゲ異常等の結果を示す。重力異常値の計算方法は、4.2 章と同一である。氷厚は、JARE-33 のアイスレーダーによる値を採用している (Kamiyama *et al.*, 1994)。図 18 には、内陸ルートにおけるフリーエア異常と単純ブーゲ異常について、緯度の関数としてプロットしたものを示す。内陸部における重力異常値は、例えばドームふじ観測拠点周辺でブーゲ異常が -200 mgal 前後であり、これまでに得られている結果 (神山ら, 1994) とほぼ同じ程度である。

4.4. ラコスト重力計の感度検定

ラコスト重力計は、重力値によってその器械感度に変化するという特性を持っており、精密重力測定を行うには、感度の検定が重要である。ラコスト重力計 G-196 および G-680 に

表 2 内陸ルートにおける重力測定結果

Table 2. Location of gravity surveyed stations, free-air and Bouguer anomalies and bedrock elevations for the inland ice sheet from the S16 area to Dome Fuji Station.

STATION NAME	LATITUDE degree	LONGITUDE degree	HEIGHT meter	DIFFERENCE mgal	GRAVITY mgal	FREE-AIR mgal	BOUGUER mgal	ICETHICK meter
(昭和基地基準点)								
S/S_IAGBN_A1	-69.007	39.585	21.49	0.000	982524.327	-9.34	-14.79	0
(9月みずほ旅行)								
S16	-69.028	40.052	584.35	-135.937	982388.202	18.48	-24.19	350
H29	-69.107	40.847	1128.00	-253.746	982270.300	63.55	0.30	970
H80	-69.232	41.150	1251.00	-320.377	982203.575	27.23	-45.24	1040
H120_1	-69.365	41.508	1378.00	-359.744	982164.208	19.03	-51.41	1290
H180	-69.587	41.998	1562.00	-420.329	982103.623	1.99	-44.22	1980
H252	-69.850	42.615	1766.00	-429.292	982094.566	40.32	-41.72	1780
S122_1	-70.022	43.130	1940.00	-443.708	982080.150	69.53	-52.77	1460
Z24	-70.200	43.453	2016.00	-485.687	982038.078	40.55	-83.77	1560
Z70	-70.443	43.873	2157.00	-534.770	981988.995	20.95	-88.62	2030
MZH	-70.698	44.332	2230.00	-537.596	981985.981	25.92	-89.87	2060
Z50	-70.368	43.743	2109.00	-507.429	982015.961	37.40	-90.82	1660
S122_2	-70.022	43.130	1940.00	-442.089	982081.301	70.68	-51.62	1460
H260	-69.877	42.695	1716.00	-430.552	982092.838	21.59	-56.15	1760
H188	-69.617	42.065	1579.00	-425.406	982097.890	-0.28	-177.02	-
H128	-69.393	41.567	1406.00	-363.719	982159.577	21.34	-48.99	1340
H124	-69.378	41.543	1396.00	-362.187	982161.109	20.69	-53.72	1260
H120_2	-69.365	41.508	1378.00	-358.410	982164.886	19.71	-50.73	1290
H116	-69.352	41.470	1372.00	-357.429	982165.867	19.64	-47.53	1330
H112	-69.337	41.435	1352.00	-350.861	982172.435	20.93	-52.44	1200
H108	-69.323	41.398	1350.00	-353.013	982170.283	18.96	-43.80	1360
H104	-69.310	41.360	1347.00	-348.326	982174.970	23.53	-49.29	1200
H100	-69.297	41.323	1317.00	-337.093	982186.203	26.30	-52.25	1060
H96	-69.282	41.290	1296.00	-335.381	982187.915	22.44	-49.22	1130
H68	-69.192	41.060	1204.00	-305.310	982217.892	29.46	-42.95	960
H15	-69.080	40.777	1050.00	-274.215	982248.987	19.79	-30.83	1030
S16	-69.028	40.052	584.35	-132.758	982390.257	20.54	-22.13	350
(10月とつぎ岬-S16ルート)								
50	-69.028	40.047	570.00	-129.834	982394.410	20.26	-21.71	336
49	-69.025	40.042	557.00	-124.256	982399.988	22.03	-19.33	323
48	-69.023	40.033	544.00	-130.309	982393.935	12.07	-28.68	310
47	-69.020	40.027	531.00	-131.693	982392.551	6.88	-33.27	297
46	-69.017	40.022	518.00	-130.012	982394.232	4.75	-34.78	284
45	-69.013	40.017	505.00	-124.797	982399.447	6.15	-32.77	271
44	-69.012	40.013	498.00	-125.326	982398.918	3.57	-35.02	264
43	-69.010	40.010	494.00	-123.448	982400.796	4.31	-34.09	260
42	-69.008	40.003	489.00	-118.063	982406.181	8.26	-29.91	255
41	-69.003	40.003	482.00	-117.855	982406.389	6.61	-31.23	248
40	-69.000	40.002	475.00	-112.223	982412.021	10.28	-27.23	241
(12月-2月JARE39ドーム夏旅行)								
S16	-69.028	40.052	584.35	-135.103	982389.224	19.50	-23.17	350
S30	-69.050	40.692	1015.00	-262.280	982262.047	23.86	-37.78	800
H68	-69.192	41.060	1204.00	-306.459	982217.868	29.42	-42.98	960
H160	-69.515	41.815	1481.00	-399.868	982124.459	2.09	-64.29	1530
H180	-69.587	41.998	1562.00	-421.520	982102.807	1.17	-45.04	1980
H240	-69.807	42.517	1713.00	-424.718	982099.609	31.55	-59.50	1550
S122	-70.022	43.130	1940.00	-443.494	982080.833	70.21	-52.09	1460
MZH	-70.698	44.332	2230.00	-539.256	981985.071	25.01	-90.78	2060
MD24	-70.970	44.177	2320.00	-541.279	981983.048	35.45	-89.11	2080
MD56	-71.255	44.085	2405.00	-560.253	981964.074	26.84	-102.04	2160
MD80	-71.468	44.013	2452.00	-565.468	981958.859	24.39	-105.20	2230
MD120	-71.828	43.890	2600.00	-596.243	981928.084	19.73	-108.89	2500
MD146	-72.060	43.807	2691.00	-608.485	981915.842	23.16	-109.80	2590
MD180	-72.365	43.693	2833.00	-607.160	981917.167	52.17	-126.56	2130
MD226	-72.777	43.528	2967.00	-635.951	981888.376	43.35	-288.75	-
MD260	-73.080	43.397	3081.00	-665.394	981858.933	33.61	-141.05	2620
MD364_1	-74.008	42.997	3353.00	-700.621	981823.706	36.47	-158.24	2780
MD398	-74.313	42.782	3476.00	-711.349	981812.978	49.14	-158.04	2800

MD444	-74.732	42.455	3551.00	-719.989	981804.338	44.09	-158.50	3000
MD486	-75.107	42.112	3598.00	-728.291	981796.036	33.17	-173.38	3020
MD500_1	-75.232	42.012	3618.00	-731.306	981793.021	30.70	-159.89	3300
MD544	-75.622	41.600	3653.00	-698.722	981825.605	56.83	-180.56	2640
MD560	-75.763	41.440	3675.00	-691.067	981833.260	65.10	-187.09	2450
MD584	-75.977	41.202	3688.00	-694.561	981829.766	56.44	-190.22	2560
MD634	-76.427	40.690	3743.00	-740.293	981784.034	8.74	-191.30	3370
MD694	-76.965	40.080	3782.00	-724.971	981799.356	14.18	-200.62	3210
DOVE-F	-77.373	39.613	3807.00	-709.119	981815.208	21.67	-222.56	2800
MD690	-76.928	40.122	3781.00	-726.569	981797.758	13.74	-208.09	3100
MD650	-76.570	40.533	3746.00	-735.924	981788.403	8.12	-194.86	3330
MD620	-76.300	40.832	3722.00	-732.932	981791.395	14.89	-198.39	3130
MD550	-75.677	41.537	3663.00	-694.503	981829.824	61.73	-189.77	2440
MD500_2	-75.232	42.012	3618.00	-730.697	981793.630	31.31	-159.29	3300
MD430	-74.603	42.552	3518.00	-713.128	981811.199	46.72	-143.08	3140
MD364_2	-74.008	42.997	3353.00	-700.478	981823.849	36.62	-158.10	2780
MD294	-73.383	43.260	3180.00	-666.460	981857.867	47.86	-164.51	2210
MD244	-72.937	43.460	3032.00	-630.367	981893.960	60.80	-158.40	1850
MD200	-72.543	43.628	2893.00	-620.876	981903.451	47.65	-130.65	2240
MD180	-72.365	43.693	2833.00	-605.200	981919.127	54.13	-124.60	2130
MD70	-71.382	44.043	2437.00	-564.100	981960.227	25.88	-92.94	2370
MZH	-70.698	44.332	2230.00	-536.023	981988.304	28.24	-87.55	2060
Z38	-70.305	43.632	2088.00	-493.338	982030.989	49.60	-82.77	1560
H260	-69.877	42.692	1776.00	-429.921	982094.406	41.67	-42.79	1760
H160	-69.517	41.820	1515.00	-397.584	982126.743	14.77	-55.42	1530
S16	-69.028	40.052	584.35	-134.093	982390.234	20.51	-22.16	350

ついて、1996 年 10 月に京都大学内にある重力基準点（京都 C）において感度検定を行った。G-196 については、オフセット角 121 秒、感度 0.81、G-680 については、それぞれ 86 秒、0.83 と求められた。1997 年 9 月に、昭和基地重力基準点（IAGBN 点）において感度検定を行った結果、G-196 については、オフセット角 188 秒、感度 0.56、G-680 については、それぞれ 124 秒、0.59 となり、重力値が大きくなると感度が低下することが確認できた。なお、極低温下での重力測定を考慮し、リーディング・ラインの変更は行わず、レベルの調整のみを実施した。

また、ラコスト重力計 G-515 についても、12 月のドーム夏旅行出発前に感度検定を行い、その後のリーディング・ラインを 2.3 から 2.1 へ変更して測定した。

5. おわりに

本論文では、JARE-38 における野外での地球物理学の諸観測についての詳細な実施報告と、予備的な研究成果について述べた。沿岸露岩域での広帯域地震計による連続観測、重力・GPS 観測により、リュツォ・ホルム湾地域のリソスフェアの構造と氷床後退に伴う地殻変動現象がわずかではあるが解明された。内陸ドームふじ観測拠点に至るまでの重力測定・GPS 観測からは、南極氷床の変形・流動と氷床下の地下構造の推定にとって貴重なデータを得ることができた。また、大陸上での短周期地震アレイ観測からは、波形の相関処理による氷床上での波動伝播特性の研究と、みずほ高原の下部地殻反射層を捉えることが期待される。さらに、将来の人工地震探査のための種々の機器の試験がなされ、実行上での問題点の摘出、ならびに実施に必要な時間・労力の見積もりも行うことができた。いずれも今後の探査実験の貴重な資料となるであろう。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、国内外の様々な方々にご助言、ご指導を頂きました。ここに厚くお礼を申し上げます。国立極地研究所事業部観測協力室には、夏・越冬期間における装備品の準備をはじめ諸々の設営的なご協力を頂きました。(株)地球工学研究所の高橋昭好氏と国立極地研究所の石沢賢二氏にはスチームドリルの開発に、また(株)エス・イー・シーの佐藤厚一氏には、投下式地震計(ペネトレーター)の開発に、それぞれ多いにご協力を頂きました。さらに、国立極地研究所の神沼克伊教授をはじめ地学研究グループの皆様には、観測システム準備のための国内でのご支援、ならびに科学的調査目的について議論をして頂きました。

また、越冬期間中ならびに夏期間の観測オペレーションの実施にあたっては、JARE-38 山内恭観測隊長、山岸久雄夏隊長、JARE-39 渋谷和雄観測隊長、そして森脇喜一夏隊長をはじめ、JARE-37, -38, -39 の各隊の隊員の諸氏には、調査旅行中の支援をはじめとし多大なご協力を頂きました。特に地学部門の根岸弘明隊員(JARE-37)、ならびに東野陽子隊員(JARE-39)には、沿岸露岩における広帯域地震計の設置と保守作業に、多大なご協力をして頂きました。さらに、JARE-38 航空部門の河端道郎隊員には、越冬中のスチームドリルの修理に大変なご尽力を頂き感謝しております。

最後に、帖佐正和艦長以下「しらせ」乗員には、JARE-38, -39 夏期間のシコルスキー・ヘリコプターでの輸送・荷受けをはじめ、多大なご支援を頂きました。ここに改めて上記の皆様にお礼を申し上げます。

文 献

- 東 敏博・金尾政紀・本山秀明(1998): ドームふじトラバースルート上における重力測定および GPS 観測. 第 18 回南極地学シンポジウム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 7.
- Hiroi, Y., Shiraishi, K. and Motoyoshi, Y. (1991): Late Proterozoic paired metamorphic complexes in East Antarctica, with special reference to the tectonic significance of ultramafic rocks. *Geological Evolution of Antarctica*, ed. by M.R.A. Thomson *et al.* Cambridge, Cambridge Univ. Press, 83-87.
- 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.
- 石沢賢二・竹内貞男・高橋昭好(1990): あすか観測拠点の排水孔掘削と孔底の上昇. 南極資料, **34**, 145-155.
- Ito, K. and Kanao, M. (1996): Detection of reflected waves from the lower crust on Mizuho Plateau, East Antarctica. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **39**, 233-242.
- 岩田昭雄・大滝 修・藤原 智・松村正一(1998): 露岩域および氷床上における GPS 連続観測. 第 18 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, 12-13.
- 神山孝吉・金尾政紀・前野英生・古川晶雄(1994): 1992 年に実施したドーム F 周辺部の重力測定. 南極資料, **38**, 41-53.
- Kamiyama, K., Furukawa, T., Maeno, H., Kishi, T. and Kanao, M. (1994): Glaciological data collected by the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition in 1992. *JARE Data Rep.*, **194** (Glaciology 21), 67 p.
- Kanao, M. (1997): Variations in the crust structure of the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica using

- shear wave velocity. *Tectonophysics*, **270**, 43–72.
- Kanao, M., Kamiyama, K. and Ito, K. (1994): Crustal density structure of the Mizuho Plateau, East Antarctica from gravity survey in 1992. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **7**, 23–36.
- Kanao, M., Shibuya, K., Watanabe, K., Fujiwara, S., Ikeda, H. and Okano, K. (1995): A note on geodetic ties among several reference points by different space geodetic techniques at Syowa Station, Antarctica. *J. Geod. Soc. Jpn*, **41**, 357–364.
- Kanao, M., Kubo, A., Hiramatsu, Y. and Shibutani, T. (1997): Crustal heterogeneity and anisotropy for shear waves in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica by the broadband teleseismic waveforms. *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, ed. by C.A. Ricci. Siena, Terra Sci. Publ., 1135–1141.
- 久保篤規・金尾政紀 (1997): 地震波速度異方性からみた南極昭和基地下の地殻-マントルのデカップリング. *南極資料*, **41**, 497–512.
- Kubo, A., Hiramatsu, Y., Kanao, M., Ando, M. and Terashima, T. (1995): Analysis of SKS splitting at Syowa Station in Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **8**, 25–34.
- 森田裕一・浜口博之 (1996): 火山体構造探査のための高精度小型データロガーの開発. *火山*, **41**, 127–139.
- Negishi, H. and Kanao, M. (1998): Field seismic observations by portable broadband seismometers in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **42**, 179–189.
- 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.
- Ootaki, O. and Fujiwara, S. (1998): Measurement of ice sheet movement at S16, East Antarctica using GPS. *Polar Geosci.*, **11**, 9–13.
- 渋谷和雄・神沼克伊・水谷 仁・藤村彰夫・塚本茂樹・山田功夫・伊藤 潔・金沢敏彦・高崎政之・伊賀 章 (1991): 南極人工地震観測用ベネトレーターの開発 (1) 1989 年度経過報告. *南極資料*, **35**, 92–117.
- 渋谷和雄・神沼克伊・早川雅彦・藤村彰夫・塚本茂樹・水谷 仁・山田功夫・小山順二・笠原 稔・伊藤 潔・金沢敏彦 (1992): 南極人工地震観測用ベネトレーターの開発 (2) 1990 年度経過報告. *南極資料*, **36**, 310–340.
- 田中俊行・金尾政紀 (1996): 構造探査用地震波形収録装置の南極における動作特性. *南極資料*, **40**, 333–346.
- Yamamoto, H. (1996): Gravity measurements with the portable absolute gravimeter FG5 at Antarctica. *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **42**, 18–22.

(1999 年 6 月 23 日受付; 1999 年 9 月 1 日改訂稿受理)