

## 南極における人工地震観測の概要 (続)

伊藤 潔\*・伊神 輝\*\*・渋谷和雄\*\*\*・神沼克伊\*\*\*・片岡信一\*\*\*\*

Field Operation of Explosion Seismic Experiment in Antarctica  
(Second Paper)Kiyoshi ITO\*, Akira IKAMI\*\*, Kazuo SHIBUYA\*\*\*, Katsutada KAMINUMA\*\*\*  
and Shinichi KATAOKA\*\*\*\*

**Abstract:** Seismic refraction experiments were carried out to investigate the crustal structure in Antarctica by the wintering party of the 21st Japanese Antarctic Research Expedition. Five experiments were made from May 1980 to January 1981 in the vicinity of Syowa Station and in Mizuho Plateau, East Antarctica. The outline of the experiments is reported with respect to the field operation and the preliminary results.

In May and June 1980, the shallow structure of an ice-free area in the vicinity of Syowa Station, Ongul Islands, was revealed by small-scale experiments. The *P*-wave velocity in this area is 6.0–6.3 km/s. In July a preliminary experiment was conducted in the ice field on the Sôya Coast along a line of about 10 km long, in which many tests were performed for ice drilling, blasting of dynamite and installation of recording system at air temperature as low as  $-30^{\circ}\text{C}$ . Shallow structure of this area was also obtained in the experiment. The *P*-wave velocity under the ice sheet is 6.0–6.2 km/s which is nearly the same as that of the ice-free area. After the success of the experiments two large experiments were conducted along a line of about 300 km long between Syowa and Mizuho Stations from October 1980 to January 1981. Explosions of 1 400 and 1 000 kg in charge amount were fired in an ice hole of 143 m deep at one end of the line near Mizuho Station and 100 m deep at the middle of the line, respectively. In addition to the shots a large explosion of 3 000 kg in charge amount was detonated at a depth of 160 m in Lützow-Holm Bay off the Sôya Coast, the other end of the line. The waves generated by the explosions were recorded successfully at 27 observation stations set up along the line. The former experiment was carried out by ten to fifteen persons for a period of forty days and the latter for a period of fifteen days. The apparent velocity of *P*-wave in the upper crust varies from 6.0 to 6.4 km/s, suggesting gradual increase with depth in the layer. The apparent velocity of 7.9 km/s for  $P_n$  wave was observed as first arrivals and that of 6.9 km/s for  $P^*$  as later arrivals.

---

\* 京都大学理学部地震予知観測地域センター. Regional Observation Center for Earthquake Prediction, Faculty of Science, Kyoto University, 944, Nasahara, Takatsuki-shi, Osaka 569.

\*\* 名古屋大学理学部地震予知観測地域センター. Regional Center for Earthquake Prediction Observation, School of Science, Nagoya University, 1, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464.

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

\*\*\*\* 日本油脂株式会社. Nippon Oil and Fats Co., Ltd., 82, Nishimon, Taketoyo-cho, Aichi 470-23.

**要旨:** 南極大陸の地殻構造研究のため、第 21 次日本南極地域観測隊では人工地震探査を実施した。これらの概要と簡単な結果について述べる。

1980 年 5, 6 月にオングル諸島周辺 および東オングル島内において、小規模な実験を実施し、露岩域の地震波速度を求めた。P 波の速度は 6.0–6.3 km/s である。7 月には宗谷海岸において大陸での予備実験を実施し、雪氷ボーリング、爆破、観測などのテストを実施して、 $-30^{\circ}\text{C}$  以下の低温下で実験が可能であることを確かめた。同時に雪氷下の岩盤の速度が得られ、6.0–6.2 km/s であった。10 月から 11 月にかけて、みずほ–昭和基地間約 300 km の測線での大爆破実験を実施した。この測線上 27 点に計器を設置し、みずほ基地付近および測線の midpoint において、それぞれ 1.4 および 1.0 t の爆破を実施した。これらの爆破孔は、それぞれ 140 および 100 m の深さである。さらに 1981 年 1 月には、同じ測線上で、リュツォ・ホルム湾内における 3 t の爆破を観測した。これらによって得られたみかけ速度は 6.0–6.4 km/s であり、深くなるほど速くなる傾向を示した。また、 $P_n$  (モホ面による屈折波) は 7.9 km/s である。下部地殻は初動としてはあらわれないが、6.9 km/s のみかけ速度が得られた。

## 1. は し が き

第 20 次日本南極地域観測隊 (以下第 20 次隊とし、他次隊も同様に略称する) では夏季オペレーションとして、夏隊による人工地震観測を実施した (伊神他, 1980; IKAMI *et al.*, 1981)。引き続いて第 21 次隊では、さらに大規模な測線上での人工地震観測を行うことになり、4 名の担当隊員が越冬するとともに、定常地球物理観測担当隊員も含めて、5 名の隊員が中心となって実施にあたった。

本報告では第 21 次隊による人工地震観測の計画から実施に至るまでの概要を述べるが、実験は第 20 次隊の成果の上に、それを継続、発展させるように実施されたので、器材などの面をはじめ、第 20 次隊の報告 (伊神他, 1980) の続報としてまとめた。また、この計画の主要な要素の 1 つである雪氷ボーリングについては、別に報告がなされているので (SUZUKI and SHIRAISHI, 1982)、ここでは最小限度の記述にとどめる。

## 2. 計画の概要と国内での準備

### 2.1. 計画の概要

人工地震によって地殻全体の構造を求める研究は、米国隊によって、地殻上層部の構造が得られている他は、ソ連隊による 2, 3 の概査的実験があるに過ぎないので (BENTLEY, 1973; KOGAN, 1972; KURININ and GRIKUROV, 1982)、モホ面下までの構造の本格的な決定が本研究の主目的である。このためには測線長が 250–300 km 以上必要となる。第 20 次隊の実験結果から、南極大陸における 1 t 余の爆薬による人工地震実験は、一応可能と判断されたが、爆破地震動の到達距離、発破孔のボーリング速度、低温下での計器の作動、などについて未知の要素が数多く残っていた。

最終的な大規模実験を次のように予定し、そのための予備的な実験を実施し、その結果をみて、次の段階に進む方針で計画を立案した。大規模実験の測線は、みずほルート (S–H–Z)

上とし、昭和・みずほ両基地間に 10 km 間隔で 25-30 台の記録器を設置する。爆破は、測線の両端および中点で実施する。それらのうち 2 発は雪氷中で各々 1-1.5 t の爆薬を使用する。もう 1 発は、薬量約 3 t の海中爆破とする。約 300 km の測線は 3-4 班で計器の作動・保守を行う必要がある。また、雪氷中の発破孔は、100 m 以上の深さを要する。この実験に要する期間は約 2 カ月とする。さらに、この本実験に備えて、露岩域および大陸における雪氷上で小規模な実験を実施する。

## 2.2. 国内での準備

計器は、第 20 次隊使用のレコーダー 10 台を含めて 30 組を準備した。レコーダーは、カセット型にオープンリール型を追加した。このレコーダーは、26 日間連続記録が可能なものである。これに伴って、必要な電池も大型化し、これらを収容する保温箱も大きなものになった。観測点の位置決定には人工衛星を利用することにし、計器の購入、テストを実施した。また、この計器が不調な場合に備えて、天測の訓練も行った。地震計は小型のものにし、埋設を可能にした。10 m の深さまで雪氷中に埋設することができるように、埋設ケースも準備した。埋設方法については、雪氷ボーリングの訓練とともに立山の雪渓においてテストした。計画に要する爆薬は 6 t であり、これは 1 度には輸送が不可能であるため、第 22 次隊に不足分の輸送を依頼し、海中爆破は翌年の夏季オペレーションとして残しておくこととした。

## 3. 観測装置の概要

### 3.1. 観測装置の構成

#### 3.1.1. 記録システム

記録システムのブロックダイアグラムを図 1 に示す。地震計は 1-3 台を使用し、1 台の時は、チャンネルごとに増幅器の増幅度をかえて、広ダイナミックレンジで記録した。データレコーダーは、第 20 次隊の使用したカセットテープ型 (勝島 CJI-N)、または新しく作製したオープンリール型 (勝島 CJ-101S) である。

#### 3.1.2. 再生システム

再生システムのブロックダイアグラムを図 2 に示す。直接アナログ録音方式 (DAR) の記録テープは、オープンリール型は 400 倍、カセットテープ型は 200 倍のスピードで再生され、必要な部分のみ別のレコーダー (TEAC-R210A) に、FM 方式で記録される。DAR テープの再生には、TEAC-R210AS および R61D を用いた。FM 方式のレコーダーは再生用にも用い、速度変換して、遅い速度で可視記録を得ることができる。また、実際に多用したのは、FM 方式のテープを記録時の 100 倍の速度で再生し、デジタルオシロスコープ上で見るとともに、付属のミニフロッピーディスクに記録し、XY プロッターに出力する方法であった。

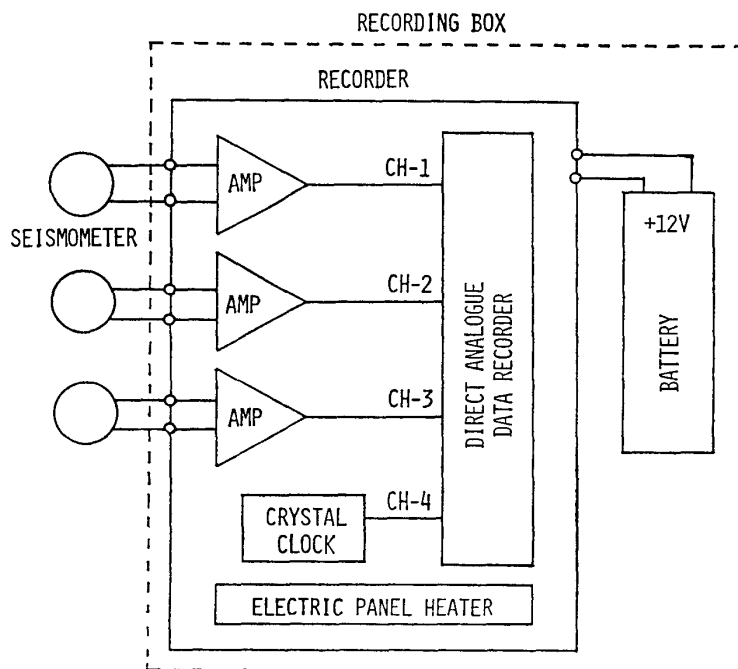


図 1 記録システムのブロックダイアグラム

Fig. 1. Block diagram of recording system.

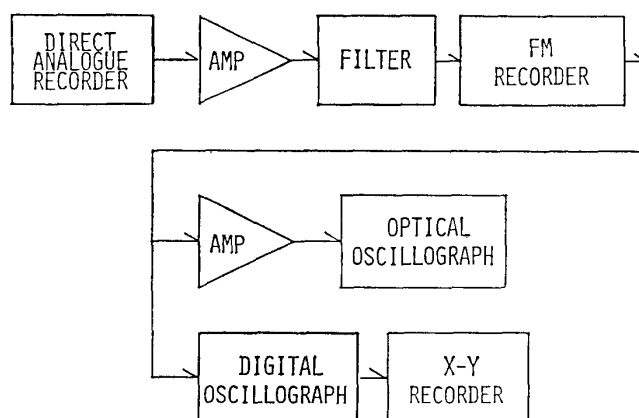


図 2 再生システムのブロックダイアグラム

Fig. 2. Block diagram of reproducing system.

### 3.1.3. 爆破時刻観測

爆破時刻は、2つの方法で観測した。1つは、ショットマーク用の雷管を親ダイ中の雷管に直列につなぎ、爆破の際にショットマーク用雷管に巻きつけた導線を切断させ、あらかじめこの導線に流しておいた電流が切れた時刻を爆破時刻とする方法である。もう1つは、発破母線にコイルを巻きつけ、コイルに流れた誘導電流を記録する方法である。2、3の小規模爆破では後者のみを用いたが、ほとんどの場合、2つの方法を併用した。記録用には、FM方式のレコーダー R61 (TEAC) を用いた。観測システムのブロックダイアグラムを、図3に示す。図には示さなかったが、DAR方式のレコーダー (CJI-N) を同時に作動させ、

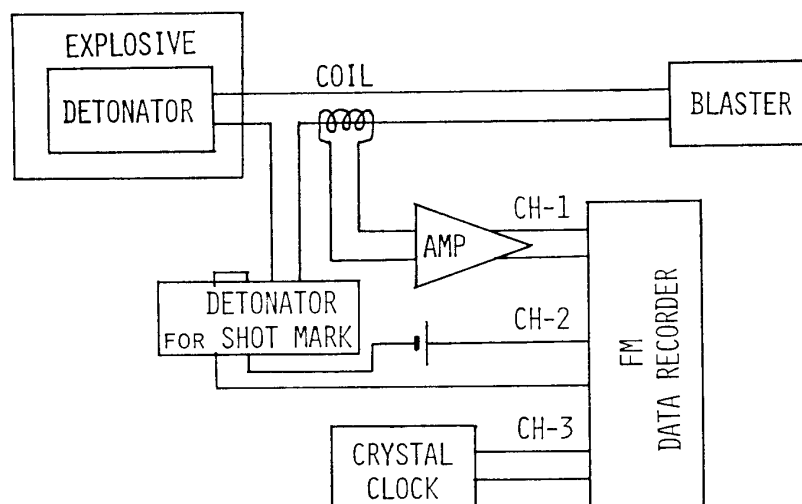


図 3 爆破時刻観測システムのブロックダイヤグラム  
 Fig. 3. Block diagram of recording system for shot mark.

同じ信号を記録させることによって、確実性を増した。

### 3.2. 主な器材

#### 3.2.1. 地震計とその設置器材

地震計は、MARK PRODUCT L-22D を用いた。固有周波数は 2 Hz，上下動，感度 0.70 V/(cm/s)，コイル抵抗 2.2 k $\Omega$  である。外部抵抗を 10 k $\Omega$  とすれば，減衰定数  $h=0.68$ ，感度 0.58 V/(cm/s) である。外形は，およそ直径 65 mm，高さ 70 mm の円筒状である。

雪氷面上での設置には，アルミ製のスパイク（6 角形で 1 辺 26 mm，長さ 1 m）を雪氷中に埋設し，そのスパイクに地震計をねじ止めした。スパイクを垂直に埋め込むことにより，地震計の水平を確保することができた。

雪氷中への埋設は砲弾形のケースを作製し，その中に上記の地震計をねじ止めした。このケースはステンレス製で，直径 109 mm，長さ 260 mm の円筒の上下に，長さ 100 mm の円錐形の金具をつけて砲弾形にしたものである。直径はアイスオーガー（Geotest 社 S9000）に合わせたもので，このドリルによって，作孔した 10 m までの孔中に設置することが可能である。このケースは径 4 mm のワイヤー 2 本でつり下げ，設置のときはアイスオーガーのつぎ手で押し込み，回収はウィンチで引き上げるようにした。

露岩上への設置はスパイクをはずして，雪および石で固定した。

地震計から保温箱までのケーブルは，耐寒性のテフロンケーブル（潤工社，ジュフロンケーブル）を用い，最初は約 20 m にして使用したが，ブリザード時など静電気による雑音が多いので，最終的には 3 m にし，ケーブルも雪中に埋設した。

#### 3.2.2. 記録用データレコーダー

データレコーダーは第 20 次隊の用いたカセット型 CJI-N と，それをもとに記録時間を

長くしたオープンリール型 (CJ-101S) を用いた。2つの型のレコーダーはともにアナログ直接録音方式で、テープスピードは 0.23756 mm/s であり、電氣的仕様は次に述べるもの以外は大きな相違はない。CJ-101S は、7号のリールで 150% テープの場合、26 日間連続記録可能であるが、CJI-N は 6.4 日である。また内蔵の増幅器の利得は、30 db より 10 db ごとに 120 db まで可変であり、100 db までの CJI-N より増幅度を大きくとれる。さらに、内蔵の水晶時計に別電源を必要としないことも CJI-N と異なっている。CJ-101S は、消費電流が 12 V で約 50 mA である。これ以外に、4 W のパネルヒーターをとりつけて保温のために使用したので、このための電力が必要である。

### 3.2.3. 電源

電源には注水電池である金属亜鉛燃料電池（三洋電機製）を用いた。カセットレコーダーには第 20 次隊と同様に 12 V, 50 Ah (12Z-50H) を 2 個、オープンリール型には 12 V, 200 Ah (12Z-200H) を 1-2 個用いた。この電源は、レコーダーに取り付けてあるパネルヒーターにも用いた。200 Ah の電池は、容量的には 20 日間以上使用可能であるが、100 mA 程度の小電流で使用していると液が凍結を起こす場合がある。電池は反応の際、発熱するが、この効果は注水直後に大きく、だんだん減少するようである。この凍結のため破損したと思われる容器が、数個あった。また、塩化ビニールの外側容器は運搬の際に破損しやすく、最後には約半数が使用不能になった。さらに、回収した電極から発火する事故が発生するなど、そりでの輸送には十分な注意を要する。

親時計と時刻校正用レコーダーの電源は、雪上車に鉛蓄電池 (12 V, 200 Ah) 2 個を積み込み、雪上車で充電しながら使用した。この電源は人工衛星位置決定装置、絶対時刻受信装置にも使用した。

### 3.2.4. 保温箱

保温箱は、第 20 次隊使用のものと保温材は同じ仕様で、外側のベニヤ板を耐水性のものにし、形を大きくした。縦、横、高さは 90×80×83 cm となり、30 個の保温箱の運搬は大変であったが、 $-40^{\circ}\text{C}$  の外気温の中でもレコーダーは十分に作動した。改善を要するとすれば、ふたの開け閉めの際、箱本体の保温材のグラスウールが、ふたに凍結してはがれていくことである。また運搬の際、箱の角が破損したり、ふたをロックするフックがとれたものがあつた。使用頻度と強度を考慮すべきであろう。

### 3.2.5. 親時計および時刻校正用レコーダー

爆破の前後に、なるべくすみやかにレコーダー内蔵時計（以下子時計という）の校正を行うためには、測線をいくつかの班に分けて、分担して作業する必要がある。爆破点用も含めて、このための親時計を 6 台、レコーダーを 5 台準備した。親時計は金石舎製 (MCXO-019) の水晶時計であり、内部発信器 (1 MHz) の精度は  $\pm 1 \times 10^{-9}/\text{day}$ ,  $\pm 1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$  ( $-10 \sim +50^{\circ}\text{C}$ ) である。電源は DC 24 V で消費電力は表示を消して 200 mA, 点灯して 1 A,

内蔵電池で約 2 時間動作する。出力は時、分、秒マークで、これを子時計の出力と同時に較正用レコーダー (TEAC, R 61, FM 方式) に記録する。また親時計同士、あるいは、人工衛星絶対時刻受信装置の出力と同時に記録することによって、全部の時計の時刻較正を行う。

### 3.3. 爆破点および観測点の位置決定

#### 3.3.1. 人工衛星位置決定装置

爆破地震において、位置決定は時刻決定と同様に重要であるので、各種の準備をした。地図が利用できる場合は、簡単な測量などによることもできるが、目標物のない南極大陸では天測または人工衛星による測地、あるいはトラバース測量が考えられる。今回の実験の場合、必要とする精度は、測線長 300 km の場合でも誤差を 100 m 以下にする必要がある。熟練を要しないことや、天候に左右される率の少ない人工衛星測量を基本として、天測も場合によっては実施するよう準備したが、実際は衛星測量を主に用いた。

人工衛星による位置決定装置としては、JMR 社の受信器 (JMR-1) およびプロセッサー (1 MP) を各 2 台準備した (JMR INSTRUMENTS INC., 1977)。この他に付属品としてカセットリーダー (1CRR)、およびシグナルシミュレーター (1SS)、予備品としてプリアンプ、アンテナなど 3-4 組を準備した。国内および昭和基地において受信テストを行い、精度について検討した後 (SHIBUYA *et al.*, 1982)、大陸で使用した。なお南極における人工衛星測位は、日本隊では第 20 次隊が最初に実施し、ベルジカ旅行隊が使用している (やまと・ベルジカ旅行隊, 1981)。

冬の実験の際、受信器の 1 台が故障した。原因は輸送中の振動のためと考えられるので、以後の実験では、防振台に乗せて雪上車に取り付けて使用した。さらに、プリアンプをアンテナに組み込むのではなく、受信器側に移して使用することにより、外気温  $-40^{\circ}\text{C}$  の時でも雪上車中で受信することができた。また、アンテナを雪上車 (SM505 号車) の屋根の上に取り付けることによって、受信作業が簡単になり、走行中の受信も可能である。問題点はアンテナ・プリアンプ間のケーブルが耐寒性でないため、破損がひどいことである。さらにこの装置全体に改良の余地が残されている。今後、取り扱いが簡単で、より信頼性の高い器械の導入が望まれる。

この装置は、NNSS (Navy Navigation Satellite System) の 5 個の極軌道人工衛星を利用しているが、同時に 2 個以上の衛星が受信範囲にはいる場合には、良好な結果が得られないという、極地方に特有な問題もある。しかし、極地域では受信する機会が多く、1 時間に 1-2 個受信することができた。この装置は 150, 400 MHz の 2 波を利用して、対流圏による波の屈折の影響を補正しているので、数十 m の精度で、1 日に 2-3 点の位置決定が可能であった。

### 3.3.2. 人工衛星絶対時刻受信装置

人工衛星からの絶対時刻（世界協定時；UTC）を復元する装置として，JLE 3300B（日本無線製）を使用した．この装置は，車載用人工衛星位置決定装置を改裝して，位置と同時に時刻もコード化して出力できるようにしたものである．雪上車中に，予備電池（DC 24 V）とともに設置して使用した．この装置は，400 MHz 1 波のみを受信するため，小型のアンテナでよいが，位置決定の精度は前述の JMR-1 より劣るので，時刻用として使用した．使用温度範囲が 0–50°C なので，電気毛布で暖めて使用するなどの注意を要した．また，計算の際の標高が 999 m までしか使用できないが，時刻に対しての誤差は無視できるので，みずほ基地付近（2 000 m 以上）でも使用できた．位置や時刻の精度については，SHIBUYA and KAMINUMA (1982) に述べられている．

## 4. 爆 薬 類

### 4.1. はじめに

爆薬類は第 20 次隊の経験に基づいて，日本油脂株式会社によって，内陸における耐寒性，耐静電気に対する安全性が検討され，製造された．

### 4.2. 爆薬

爆薬は 3 種類が準備された．内陸用特殊爆薬は保存温度  $-60^{\circ}\text{C}$ ，使用可能温度  $-50^{\circ}\text{C}$ ，耐水圧  $15\text{ kg/m}^2$ —48 時間，比重 1.5，爆速  $6\,500\text{ m/s}$ ．海中用特殊爆薬は使用温度  $-10^{\circ}\text{C}$ ，耐水圧  $15\text{ kg/m}^2$ —5 時間，比重 1.5，爆速  $6\,500\text{ m/s}$ ．もう 1 種類は南極向特桐ダイナマイトで，小規模な氷の発破テストなどに使用するもので，使用温度  $-30^{\circ}\text{C}$  である．

前 2 者の外形は円筒形で直径 101.5 mm，長さ 455 mm，1 個の重量は 5 kg である．この薬径は，雪氷ボーリング孔径 140 mm にあわせて決めたものである．

爆薬類について性能は問題なかった．

### 4.3. 電気雷管

電気雷管も爆薬に対応して 3 種類準備した．脚線は，いずれも耐寒のためテフロン線を用いた．また耐静電気は  $2\,000\text{ pF}$ ， $20\text{ kV}$  である．内陸用は使用温度  $-60^{\circ}\text{C}$ ，耐水圧  $2\text{ kg/m}^2$ —24 時間，海中用は使用温度  $-10^{\circ}\text{C}$ ，耐水圧  $15\text{ kg/m}^2$ —5 時間である．また一般用は使用温度  $-30^{\circ}\text{C}$ ，耐水圧  $2\text{ kg/m}^2$  で 24 時間である．

### 4.4. その他

発破器は，100 発掛（ $8\text{ }\mu\text{F}\times 600\text{ V}$ ）と 500 発掛の 2 台を準備した．保温袋に入れ，カイロで暖めて使用した．

発破母線は，内陸では耐寒用ジュフロンケーブル（地震計からの接続線と同じもの）を使用した，海中の部分はビニール平行線を用いた．



## 5. 人工地震実験の概要

### 5.1. オペレーションの概要

当初の計画では、越冬開始後、4月中旬に大陸で予備実験を行い、その結果を検討したうえで、みずほルート上約 300 km の測線での実験を検討する予定であった。しかし、1980 年秋は海水状態が悪く、大陸に渡れる時期が大幅に遅れた。このため計画を変更し、5月から6月にかけて、オングル諸島周辺において、小規模な実験を行い、計器のテスト、およびはじめて人工地震実験に参加する隊員の訓練も兼ねて、露岩地域の地下構造の調査を実施した。

大陸における予備実験は7月後半に実施し、10 km の測線に 10 点の観測点において、火薬量、発破孔深度、地震計の埋設深度などを変えて、大規模測線のための基礎的な実験を行った。また、この実験は、測線長 10 km で、大陸氷床直下の構造調査をも目的としている。

以上の実験結果を検討し、10月下旬から11月にかけて、みずほルートに沿う測線上での大規模実験を実施した。この春の実験では、測線上の2点で、氷床に爆破孔を掘削し、孔中で爆破を実施し、測線上 27 カ所で爆破による地震動の観測を行った。2カ月間の予定で実験を開始したが、開始時期は大型雪上車が海水を渡れる最後の時期とし、実験終了後は航空機による基地への帰投、あるいは最悪の場合は、見返り台 (S16) における越年を考えた。しかし、実験は天候に恵まれ、約 40 日で終了し、そのうえに海水状況も、それほど悪化しなかったため、11月末には小型雪上車によって、基地に帰投することができた。

同じ測線で、海中爆破を観測するオペレーションは、春の実験の際に、観測用保温箱などを設置したままにしておいて、1981 年 1 月上旬に実施した。第 22 次隊に依頼した、追加分の火薬が届いた頃、爆破を予定したオングル海峡の海水は流れて、爆破実施は不可能となったため、急ぎょ、「ふじ」碇泊地付近の定着氷上に変更して実施した。

表 1 にオペレーションの概略を示す。以下個々の実験について述べる。

### 5.2. 東西オングル島における実験

#### 5.2.1. 実験の概要

4月中旬に予定した大陸での予備実験が、海水状況のため不可能になったので、5月中旬から6月にかけて、オングル諸島周辺の露岩地域での実験を実施した。東南極においては氷床下に 5.8 km/s より遅い速度の層が確定していないので (BENTLEY and CLOUGH, 1972), 直接、露岩地域で表層の速度を調べることは、他地域と比較のうえでも興味深い。また、大規模測線のための爆破および観測の実施テストも兼ね、支援を頼む多くの隊員の訓練をも目的としたので、実験を冬明け前に実施しておく必要があった。

測線はなるべく長くにとって、露岩域の深いところの構造を求めるよう計画したが、海水状況のため、図 4 に示したような配置となった。爆破も、測線の両端で実施するよう予定したができなかった。日照時間がなくなる 5 月 20 日頃までには実験が終了するという計画で、

表 1 第 21 次隊で実施した人工地震実験の概要  
 Table 1. List of seismic refraction experiments conducted by the 21st Japanese Antarctic Research Expedition.

No.	Place	Date for experiment	Shot			Observation		Positioning	Remarks		
			No.	Date and time	Charge size (kg)	Shot point	No.			Length of line (km)	
1	East and West Ongul Islands	May 12–June 3, 1980	3	May 19 12h00m	100	at sea, depth 55 m	11	5.2	Survey with transit and a map (1: 5000)		
			4	May 20 12 30	80	at sea, depth 55 m		2.8			
2	East Ongul Island	June 5–6, 1980	5	June 5 13 30	0.7	blast in rock outcropped in the island	8	0.68	Plane table surveying on a map of 1: 2000		
			6	13 38	0.1			0.58			
			7	13 43	0.1			0.58			
			8	13 53	0.2			0.30			
			9	June 6 11 45	0.6		8	0.87			
3	Sôya Coast	July15–31, 1980	10	July 22 13 27	25	ice hole 15 m	10	9.5	Satellite surveying and traverse with a hand-bearing compass and distance meter of snow-vehicle	Shot point (No. 10–15) 69°01'35″S 40°18'46″E 777 m Shot point (No. 16) 69°02'33″S 40°34'32″E 951 m	
			11	14 18	10	ice hole 10 m					
			12	15 14	100	ice hole 30 m					
			13	July 27 11 10	20	ice hole 10 m					
			14	11 50	20	ice hole 5 m					
			15	12 40	45	ice hole 10 m					
			16	July 29 14 10	100	ice hole 30 m					
4	Mizuho Plateau	Oct. 16–Nov. 21, 1980	17	Nov. 12 18 00	1 400	ice hole 143 m	27	246	Satellite surveying	Shot point 70°41'17″S 44°15'35″E 2246 m Shot time 15 h 00 m 00.63s (UTC) Shot point 69°46'25″S 42°26'27″E 1692 m Shot time 13 h 00 m 00.30s (UTC)	
			18	Nov. 15 16 00	1 000	ice hole 100 m		126			
5	Lützow-Holm Bay	Jan. 4–19, 1981	19	Jan. 12 18 00	2 977	at sea, depth 160 m	27	300	Satellite surveying	Shot point 68°48'42″S 38°53'26″E Shot time 14 h 59 m 59.63s (UTC)	

Shot point  
 69°01'35"S 40°18'46"E  
 777 m  
 Shot point (No. 16)  
 69°02'33"S 40°34'32"E  
 951 m

Shot point  
 70°41'17"S 44°15'35"E  
 2246 m  
 Shot time  
 15 h 00 m 00.63s (UTC)  
 Shot point  
 69°46'25"S 42°26'27"E  
 1692 m  
 Shot time  
 13 h 00 m 00.30s (UTC)

Shot point  
 68°48'42"S 38°53'26"E  
 Shot time  
 14 h 59 m 59.63s (UTC)

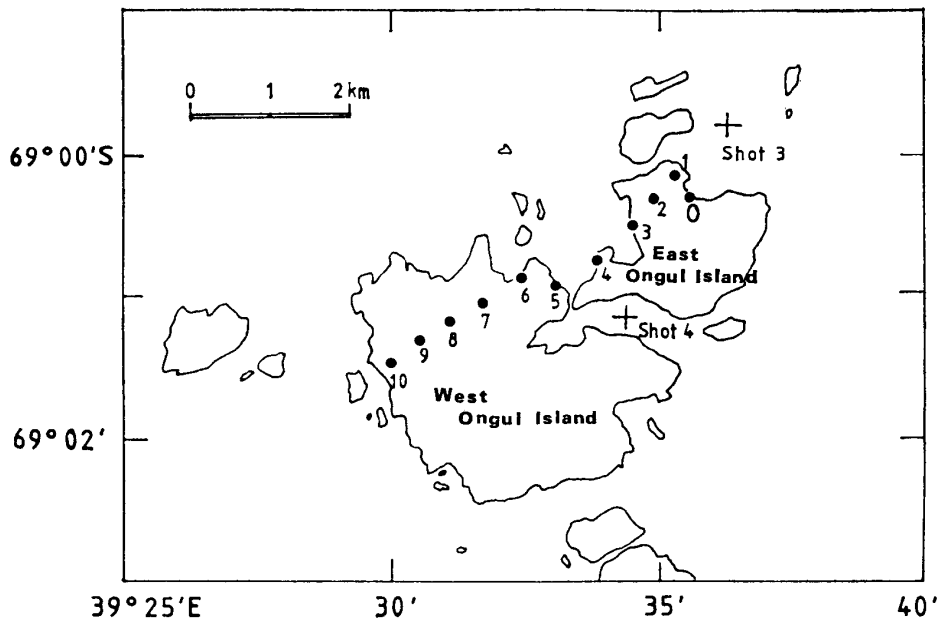


図 4 オングル諸島周辺での爆破点と観測点

Fig. 4. Shot (plus sign) and observation (solid circle) points in the vicinity of Ongul Islands.

5 月 6 日に準備を開始し、12 日より観測点を設置、19 日に Shot 3 の爆破を実施、20 日には Shot 4 を実施した。また、爆破の前後にレコーダー内蔵時計の較正を行った。その後、天候が悪化し、6 月 3 日に全計器の撤収を終えた。フィールドのオペレーションには、基地在住の隊員 29 人中 23 人が参加し、延べ 129 人日の人手を要した。

#### 5.2.2. 爆破

爆破点は図 4 に示す 2 カ所である。100 kg の火薬を爆破するため、藤原 (1971)、森脇 (1974) の海底地形図から水深 50 m 以上で、氷盤の堅固な地点を選定し、測深して決定した。Shot 4 は西オングル島の南西沖を予定したが、ブリザードで海氷が流れて実施できず、図 4 の貝の浜沖に変更した。

爆破の実施経過は、次のとおりである。5 月 6-9 日に爆破用木箱 (すの子状) 2 個を作製、海中発破用母線 (正副 2 本) を懸吊用ロープに結束した。5 月 17 日 Shot 3 の準備をしたが、強風および発破時刻が対銚子無線局通信時と輻輳したため延期し、19 日に実施した。氷厚 43 cm の海氷に 1.5 m 平方の穴をあけ、空ドラム缶 1 本を浮きとして、100 kg の爆薬を水深 55 m の海中にセットした。沈下作業は人力で行い、3 名を要した。点火および発破時刻観測は、約 150 m 離れたネスオイヤで実施した。

Shot 4 は貝の浜沖合で、80 kg の火薬を水深 55 m の海中で爆破した。当日の作業は約 3 時間で、爆薬はそりに積み、西の浦、中の瀬戸経由で運んだ。点火および発破時刻観測は貝の浜にテントを張って実施した。

### 5.2.3. 観測

東西オングル島内に 11 点の観測点を設置した。No. 0 の観測点以外は、上下動地震計を各 1 台、露岩上に石と雪でかためて設置した。各点には保温箱を置き、オープンリール型のレコーダーで波動を記録した。No. 0 の観測点には露岩上の地震計以外に、深さ 1, 2, 3 m の雪氷孔中に地震計を設置して、地震計の埋設テストを行い、地震波動観測に対する地震計埋設の効果を調べた。

観測計器は、浮上型雪上車 (SM 15) および小型そりを用いて運搬した。雪上車がタイドクラックを渡れない時は、小型そりに計器を積み、スノーモービルまたは人力で小型そりを引いて設置点まで運んだ。設置には正味 3 日を要した。

17 日と爆破当日の 19, 20 日の計 3 回、レコーダー内蔵時計の較正を行った。小型そりに較正用親時計とレコーダーを積み、スノーモービルでそのそりを引いて全点を回った。

回収も設置と同様な方法で行い、実質的には 3 日を要したが、荒天と海氷状況悪化のため終了したのは、爆破終了後 14 日目の 6 月 3 日であった。

### 5.2.4. 結果

爆破は小薬量ではあったが、大規模実験における海中での 3 t の爆破を想定して行った。この結果、作業の流れ、必要器材、その他南極における諸条件を、およそつかむことができた。

観測に関しては、爆破時刻観測用の 2 台のレコーダーのうち、1 台 (FM 型) が低温のため作動しなかった他は、大きなトラブルはなかった。撤収時に、燃料電池のケースの破損による液もれがあった。

記録は良好なものが得られ、露岩域の上層部の速度が得られた。初動のみかけ速度は約 6 km/s で、顕著な後続波として、みかけ速度約 3 km/s の波がみられた。氷中に埋設した地震計でも波動が良好に観測された。しかし、フリザード時など荒天時の雑音は、深さ 3 m の一番深い地震計でも減少する傾向はみられず、通常の雑音もあまり変わらなかった。

また、第 21 次隊最初の人工地震関係のオペレーションであり、多くの隊員が参加し、後の大規模実験に対する訓練としても有効であった。

## 5.3. 東オングル島内における小規模実験

### 5.3.1. 概要

東オングル島の迷子沢において、陸上滑走路建設の可能性を探る調査として、岩盤を爆破した。この爆破による地震動を、表層構造探査に利用するため、迷子沢から水汲み沢にかけて観測した。表 1 に示すように、5 発の爆破による地震動を 6 月 5, 6 日の 2 日間で観測した。

この実験の目的は、前節の実験よりさらに浅い露岩域の速度を得ることである。前節の実験では、測点間隔は約 1 km であり、爆破点から 1 番近い観測点まで 0.7 km であった。し

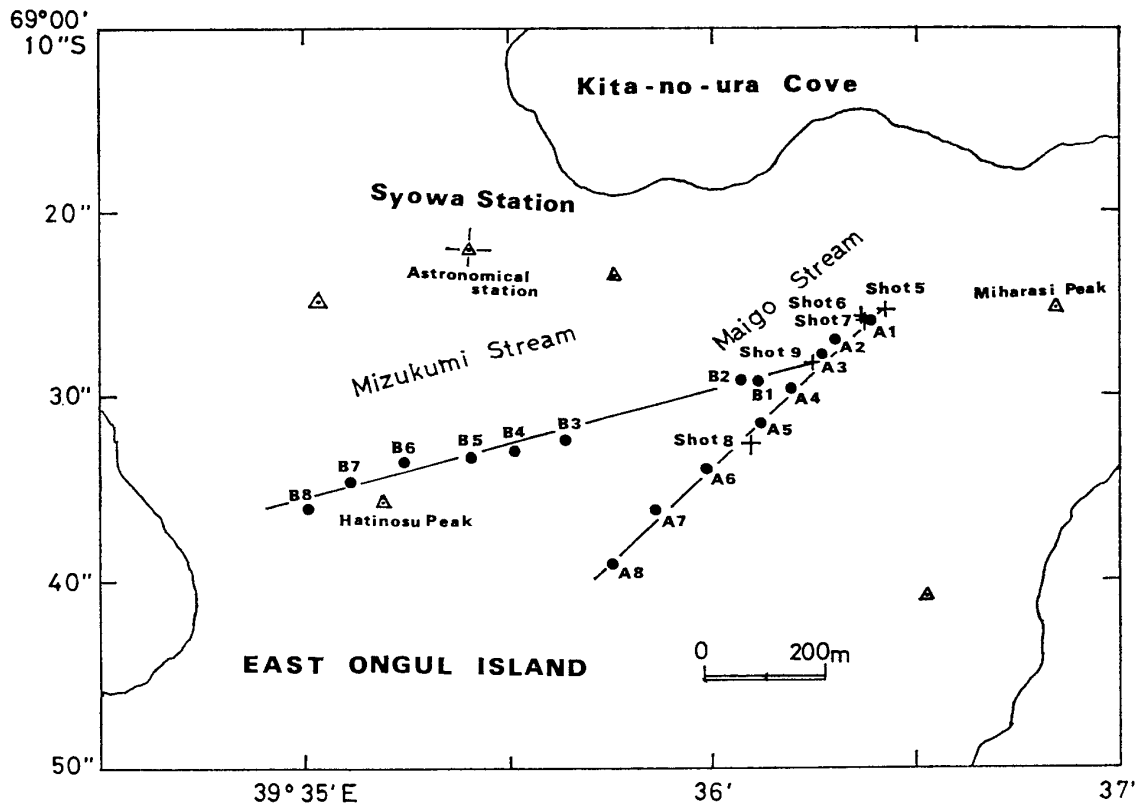


図 5 東オングル島迷子沢, 水汲み沢における爆破点と観測点

Fig. 5. Shot (plus sign) and observation (solid circle) points for Shots 5-9 at Maigo and Mizukumi Streams in East Ongul Island.

たがって、本節の約 1 km 程度の測線による調査で、最表層の速度が得られれば、前節の結果とあわせて、より浅部から深いところまでの速度分布が得られる。

### 5.3.2. 爆破および観測

爆破点および観測点を図 5 に示す。Shot 5-8 による地震動は観測点 A1-A8 で観測し、翌日に Shot 9 による地震動を B1-B8 で観測した。爆破は、地表に露出している大きい岩盤に、孔径 50 mm、深さ 50-90 cm の孔を 2-3 本あけ、その中に火薬を詰めて爆破する方法で実施した。爆破の薬量は、100-700 g である。

この実験では、観測点と爆破点の距離が近いので、DAR 方式のレコーダーは、周波数特性の点で使えない。この規模の実験は予定していなかったもので、時計校正用の FM 方式のレコーダー (TEAC, R60) を使用し、雪上車で暖房しながら使用した。地震計は L-22D を岩盤上に石で固定し、出力を 100-300 m のケーブルで 2 台の雪上車に引き込み記録した。1 台の雪上車で爆破時刻と 2 点分、もう 1 台で 6 点分の記録を得た。増幅器および時計は、カセット型レコーダー (CJI-N) 内蔵のものを使用した。

### 5.3.3. 結果

初動を確実に記録するため、増幅度をあげたので、ほとんどの記録は飽和してしまった。

それでも、顕著な後続波が得られ、前節の実験と同様な結果が得られた。 $P$ 波のみかけ速度は  $6 \text{ km/s}$ 、後続波は  $3.0 \text{ km/s}$  である。これらのことから、オングル島周辺の露岩域の  $P$ 波の速度は、 $6 \text{ km/s}$  であることがわかった。これより遅い速度の層は、岩盤の層としてはみられない。このことは、 $6 \text{ km/s}$  層の走時の原点走時が、Shot 5-9 および Shot 3-4、いずれも  $0 \text{ s}$  であることからわかる。

#### 5.4. 大陸における予備実験（冬の人工地震）

##### 5.4.1. 概要

大規模測線における実験の全般的検討と、大陸氷床直下の構造調査のため、予備実験を7月下旬に17日間かけて実施した。測線は約  $10 \text{ km}$  とし、およそ  $1 \text{ km}$  間隔で観測点をおいた。爆破は、測線の両端で各々  $100 \text{ kg}$  の爆薬を使用する他に、片端では、薬量および爆破孔の深さを変えて、氷床中の爆破による波動を調べた。爆破孔も最深  $30 \text{ m}$  とし、雪氷ボーリングの機械のテストとともに掘削速度を調べ、 $100 \text{ m}$  以上の掘削が人的、期間的に可能かを調べた。さらに、地震計も雪氷上だけでなく、 $3, 5, 10 \text{ m}$  の深さに埋設し、波動の様子や、雑音について調べた。測線の位置は、アイスレーダーの結果 (SHIMIZU *et al.*, 1978; OMOTO, 1976)、基盤地形が複雑であると思われる場所を避けて、S ルート上 S22 から S27 付近とした。図6に爆破点と観測点を示す。

準備は7月上旬に開始した。大型雪上車を大陸に渡すことが不可能な海氷状態であったため、小型雪上車で、数回にわたって、とつぎ岬への荷上げを行い、7月15日に昭和基地を出発した。とつぎ岬からは、デポしてあった大型雪上車 (SM 50) を使用した。2班に分けて、1班が爆破孔のボーリングおよび爆破を、他班が計器の設置と観測を担当した。各班は5名で構成し、最初 S22 地点でキャンプし、ボーリング孔の掘削と計器の設置を行った。5日間で準備を終え、6発の爆破を実施した後、S27-3 地点にキャンプを移し、この地点において1日で  $30 \text{ m}$  という雪氷ボーリングに成功し、もう1発の爆破を翌日に実施した。

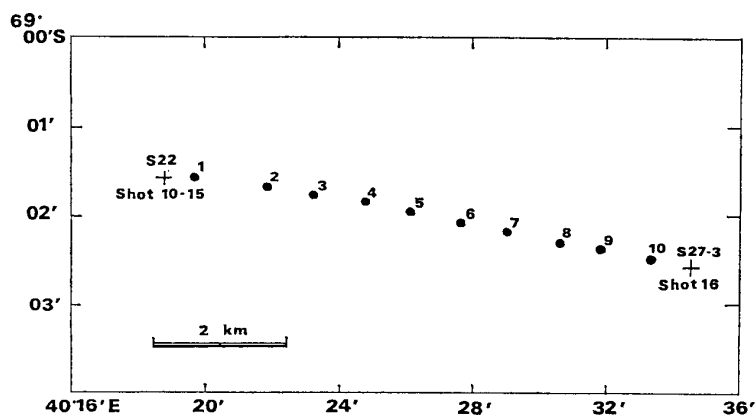


図6 宗谷海岸における Shot 10-16 の爆破点と観測点  
Fig. 6. Shot (plus sign) and observation (solid circle) points for Shots 10-16 in Sôya Coast.

全日程 17 日, このうち 4 日はブリザードのため作業不能であった. 大型雪上車 2 台, 幌カブース 1 台 (ボーリングそり), 居住カブース 2 台, そり 4 台を使用した.

#### 5.4.2. 爆破

必要器材は, 7 月 4 日より 1 週間で準備した. 爆薬 320 kg は, 古ぶとんをクッションとしてそりに積み込み, 雷管は, 雪上車中に入れ, 手持ちで運んだ. キャンプ地では, 居住カブースから 200 m ほど離して, 爆薬を積んだそりをデボし, そこから居住カブースをはさんで反対側に同程度離して, 雷管を埋め, 目印に旗をたてて保存した.

7 月 22 日に発破作業を開始した. 外気温はおよそ  $-30^{\circ}\text{C}$ , 風速 3 m 以下であった. 静電気, 漏洩電流などのチェックをして, 安全を確認した後, 親ダイを作成した. 爆薬の中心に電気雷管を埋め込む方法と, あらかじめ用意した親ダイ用爆薬セットに雷管を挿入する方法の, 2 つの方法で親ダイを作製し, 両者を比較した. 結果はともに良好であった. 増ダイは自由落下で装填したが, 親ダイは発破母線との結線部に力が加わらないように, ロープで静かに吊り落して装填した. 発破母線には, 耐寒用のテフロンケーブルを使用した. ショットマーク用雷管は, 点火地点から約 20 m 離して, 50 cm ほど雪の中に埋めた. 同様の方法によって, 7 回の発破作業を実施した (表 1, Shot 10-16).

発破の準備作業のうち, 発破母線の結線は, 手袋なしで行わねばならず, 低温下で多数の結線を行うのは困難である. また, 結線部のテーピングには, 自己融着テープが有効であることがわかった.

Shot 12 の際に不発が発生した. これは発破器を 100 発掛から 500 発掛にかえて容量をあげ, 雷管を内陸用にかえて解決した. 不発を起こした原因は雷管にあると思われる. この雷管は一般用のもので, 以後この雷管の使用は中止した.

孔径 14 cm, 深さ 30 m の発破孔では, 火薬装填時の残孔長は火薬の長さから計算した値どおりで, 特に火薬がつぶれるようなことはなかった. 薬量と残孔長の関係から爆破係数を求めると, 1 000 kg の爆破の場合, 雪氷中の残孔長は, およそ 20 m 以上あれば良好な爆破ができることがわかった.

#### 5.4.3. 観測

観測点は, 図 6 に示すように 10 点をおよそ 1 km 間隔で配置した. 地震計は観測点 No. 2 と No. 5 を除き雪氷面上に設置し, 雪で埋めた. No. 2 と No. 5 の 2 点には, 雪氷面上に加えて, 深さ 3, 5, 10 m の雪氷孔中にも設置した. これらの設置孔は 2-3 m 離して, アイスドリルによって手掘りで作孔した. 各設置点では, 上下動地震計各 1 台につき 1 台のレコーダーを使用した. レコーダーはすべてオープンリール型 (CJ-101S) を用い, 各々 1 個の保温箱に入れた. レコーダーは, 3 成分に各々増幅度の異なる信号を記録し, ダイナミックレンジをあげた. 計器はこうして 16 セットを使用した.

#### 5.4.4. 結果

表1に示すように、Shot 10-16 の合計7発の発破による地震動を観測した。このうち Shot 12 および Shot 16 は薬量が 100 kg で、全点で良好な記録が得られ、雪氷下の浅い部分の構造解析に用い、他の発破は主に発破の効きを調べた。また観測点 No. 2 と No. 5 では雪氷孔中で観測される波動の深さ変化を調べた。

雪氷上と、3, 5, 10 m の深さで観測された波動に、顕著な差は見い出せなかった。深さ 10 m の氷の密度は約  $0.5\text{g/cm}^3$  であり、雪氷面上と波動に直接大きな差をもたらすほどではない。また、雑音が深さとともに減少する傾向も、特に顕著ではなかった。静穏時のノイズレベルは、 $1\text{ }\mu\text{kine}$  ( $1\text{ kine}=1\text{ cm/s}$ , 速度) 以下であるが、風が吹くと数百  $\mu\text{kine}$  に増加する。深さによる雑音の減少傾向は、ブリザード時にも見られず、風速が約  $18\text{ m/s}$  を越すと、パルス状のノイズが深さにかかわらず顕著になる。風速  $12\text{ m/s}$  以上になれば、雑音は増幅度  $80\text{ db}$  でレコーダーのテープノイズ以上になり、爆破地震動の観測は事実上不可能になる。

爆破点と観測点の位置決定は、JMR (衛星位置決定装置) を使用する予定であったが、輸送中に受信器の  $5\text{ MHz}$  発信器が破損して作動しなかった。このため、ハンドベアリングコンパスと雪上車の距離計で、ルート上の旗を測定する簡易トラバース測量を実施し、爆破点は後日の測量のために旗を残した。発破点の JMR による測位は、次節に述べる春の実験のとき実施し、上記のトラバース測量とあわせて位置決定を行った。したがって、この実験による位置の誤差は  $100\text{ m}$  程度である。

時刻については、親時計1台ですべての時計を校正した。ブリザード時の静電気に起因すると思われる子時計のタイムコードの狂いが、16 台中 5 台に発生したので、発破の直前あるいは直後 (1 時間以内) に校正し、 $0.01$  秒の精度を確保した。

撤収の際、燃料電池の一部が凍結していることがわかった。凍結した電極は S16 地点に持ち帰って解凍した。さらに、輸送の際にかなりの数の電池ケースが破損し、一部が再使用不能になった。その他、計器については、増幅器のノイズレベルが高くなっているものがあった。これは、静電気等による過大入力が原因と思われる。埋設した地震計は、1 台を除いて、簡易ウィンチで回収可能であった。

得られた記録からは、初動のみかけ速度がおよそ  $6\text{ km/s}$  となり、氷床直下の岩盤の  $P$  波速度が得られた。また、みかけ速度約  $3.5\text{ km/s}$  の波動、および  $1.6\text{--}1.7\text{ km/s}$  の分散性の顕著な後続波が得られた。

## 6. 大陸における大規模人工地震

### 6.1. 概要

7 月の予備実験の結果を検討し、本実験を大陸で実施することに決定し、すぐに準備を開始した。測線は昭和・みずほ両基地間約  $300\text{ km}$  とし、両端および中点付近で爆破を実施す



ることとした。

みずほルートを測線に選んだ理由は、次のようなことによる。まず、このルート上でこれまでに重力、アイスレーダーなど各種の測定が行われており、第 21 次隊では航空磁気測量が実施されていた。これらのデータと、人工地震によるデータを比較することによって、基盤構造のモデルを作り、これをもとにして人工地震による探査のない地域でも、他のデータから推定する基盤構造モデルが、より確実なものになる。さらに、測線の片端での爆破を海中で実施することにより、爆破の効きをよくし、雪氷中での効きの悪さを考えても、モホ面下の速度の測定ができること。また、測線のもう片方、みずほ基地付近で爆破を実施するにあたり、雪氷ボーリングのためのキャンプ地として、みずほ基地を使用することができ、基地在住の隊員から援助を受けることができることなどである。さらに、みずほルートは整備されており、往復が容易であるばかりでなく、トラバースボールの位置がトラバース測量によって決定されており (NARUSE and YOKOYAMA, 1975; NARUSE, 1978), 人工衛星測位が万一不調な場合でも、一応観測点位置が決定されることなどである。

この実験で使用する総薬量は、全部で 5.4 t であるが、基地には 3.9 t しか残っていないので、第 22 次隊によって 1.5 t を補給することとした。

爆破の実施は諸般の事情を検討した結果、10 月末から 12 月中旬までの約 60 日間を春の実験、第 22 次隊到着後、約 20 日間を夏の実験として、2 回に分けて実施することとした。春の実験は海氷状況を考慮し、大型雪上車が海峡を渡ることができる 10 月中に出発し、12 月中旬までには終了させる。実験終了後、海氷状況によっては航空機による基地への帰投、さらに、航空機も飛べない状況の場合は S16 で越年することを考えた。

実際には、実験は順調にすすみ、11 月中には、全員小型雪上車で基地に帰投することができた。海氷状況も予想ほど悪化しなかったからである。

春の実験では、みずほ基地付近および中点 H231 付近において、2 発の爆破を実施し、その地震動を測線上 27 点の観測点で観測した。実験終了後、夏の実験に必要な地震計、保温箱などの器材はそのまま残し、レコーダーやボーリング機械などを基地に持ち帰った。夏の実験では、オングル海峡で約 3 t の爆破を実施する予定であったが、海氷状況が悪化し、実施不能になったため、急きょ、リュツォ・ホルム湾の「ふじ」碇泊地付近の強固な氷盤付近に変更し、その定着氷下 160 m の海中において爆破を実施した。この波動を春の実験と同じ 27 点で観測し、大規模測線における実験が完結した。

## 6.2. 春の人工地震

### 6.2.1. 行動概要

爆破点と観測点は図 7 に示す。春の実験では、Shot 17 と Shot 18 を実施した。

実験は 2 段階に分けて実施した。爆破孔の掘削と観測点の位置決定と計器の設置に、どの

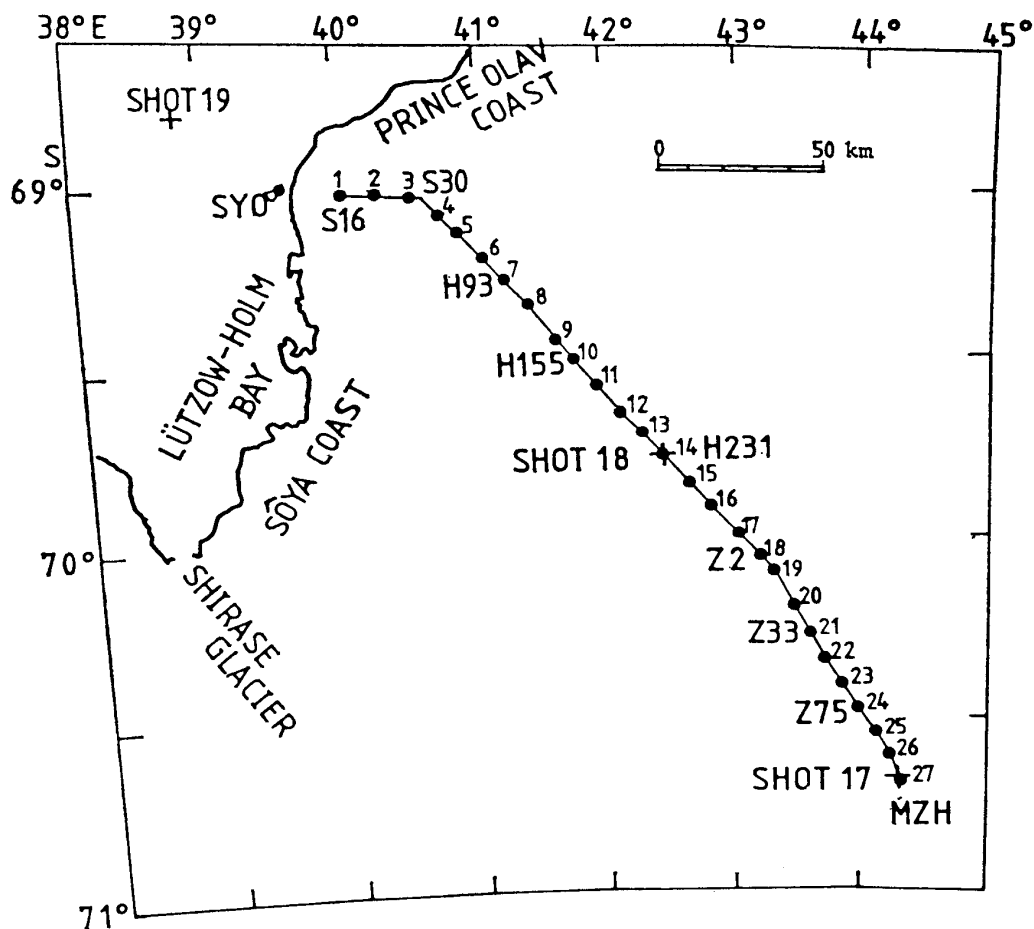


図 7 みずほ高原における Shot 17-19 の爆破点と観測点。SYO; 昭和基地, MZH; みずほ基地

Fig. 7. Shot (plus sign) and observation (solid circle) points for Shots 17-19 in Mizuho Plateau. SYO and MZH indicate Syowa and Mizuho Stations, respectively.

程度の期日を必要とするか確定していなかったため、第1段階として、上記の作業を実施した。第2段階は計器を作動させて、時計の較正を行い、爆破を実施することであった。このために、第1段階では2班、第2段階では4班の旅行隊を編成した。第1段階では、ボーリング班5名が H231 地点、およびみずほ基地付近において、爆破孔掘削のための雪氷ボーリングを実施する。その間に、設置班5名が計器の設置と位置決定を行った。これらが終了した後、第2段階にはいり、ボーリング班は発破班となって爆破を実施した。また、設置班はあらたに人員を増して、各班3名からなる作動班3班を編成し、測線を3区分して、受持区域の計器の作動、時計の較正などを行った。第2段階では4班が時間を合わせて、独立に行動するため、その食料、装備および通信など、旅行隊に必要なものの準備が大変であった。大型雪上車5台、居住カブス3台、そり15台を使用し、基地の旅行用装備はほとんど全部使用した。機械の保守部品は各班とも最低限度に携行し、携行部品で修理不能な場合は、航空機に頼ることにした。どれかの班に故障が発生すれば、それはすぐに計画全体に大きく

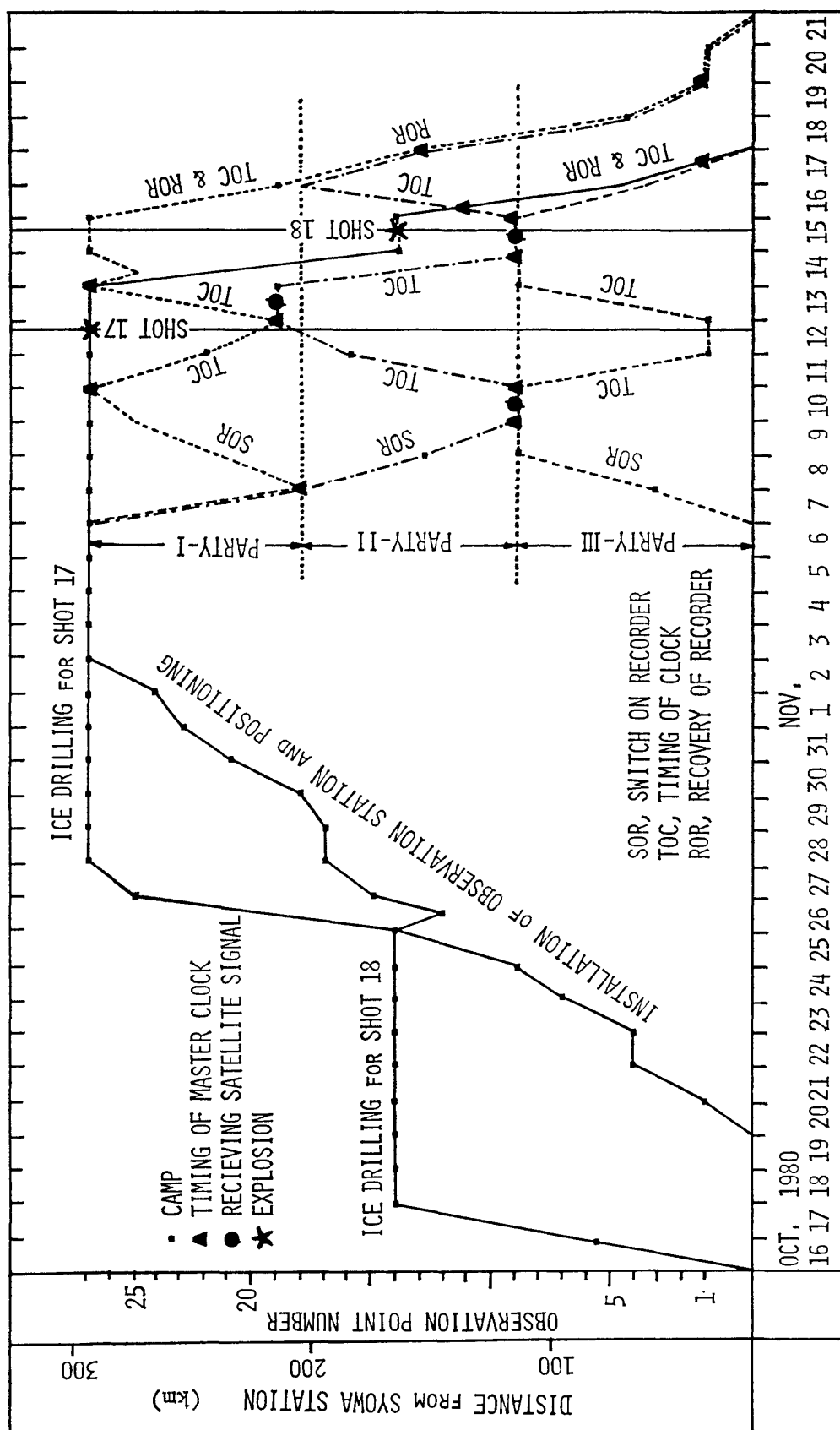


図 8 1980 年 10, 11 月に行われた実験の行動概要図  
 Fig. 8. Diagram of the field operation for the experiment in October to November 1980.

影響するので、これを防ぐため、航空機によるバックアップ態勢は有効であった。食料については 1 000 人日分を準備した。

図 8 に各班の行動の様子を示す。10 月 16 日に基地を出発したボーリング班は H231 における孔径 14 cm、深さ 100 m の雪氷ボーリングを 17 日に開始し、25 日には終了した。その後すぐに、みずほ基地付近の Z102 に移動し、いくつかのトラブルを克服し、11 月 5 日に 143 m まで掘削し、ボーリング機械のウィンチのワイヤーが伸びきって、掘削を完了した。設置班はボーリング班より 5 日遅れて、10 月 20 日に基地を出発し、11 月 3 日に、図 7 に示す 27 点の計器の設置を終えた。同時に、全点における人工衛星による位置決定も実施した。こうして第 1 段階が終了し、第 2 段階にはいった。発破班は、みずほ基地付近で Shot 17 (1.4 t) の準備を開始し、作動班 3 班が受持区域の計器の作動を開始したのが、11 月 6 日である。作動班は計器を作動した後、同じルートを引き返して、子時計の較正を行った。これは、作動直後は計器が定常状態にならず、ある程度の時間の後に時計の較正をしないと、十分な精度が得られないためである。すべての準備が完了して、11 月 12 日に Shot 17 を実施した。この実施当日には、各班の通信は重要である。測線上の天候、特に風速は直接、雑音の大きさに影響する。爆破時刻は、統計的に風速の落ちる 16 時 (LT) を予定し、全日通信網を開いて、各班は連絡をとった。爆破点でのトラブルにより、爆破は 18 時に延期したが、17 時頃から通信状態が悪化したので、航空機を測線中点の上空 (H180 付近) に飛ばして、各班との通信を確保し、無事爆破を終了した。

この後、発破班は H231 地点に移動し、次の爆破の準備にはいった。その間、作動班は時計の較正とテープのとりかえなど、受持区域の計器の保守を行い、11 月 15 日には Shot 18 を実施した。終了後、地震計と保温箱はそのまま残し、レコーダーと電池のケースを回収した。

実験日程の前半は、ブリザードで停滞した日もあったが、後半は天候にも恵まれ、実験は予想よりはるかに順調に進んだ。雪氷ボーリングが、順調にすすみ、人工衛星による位置決定装置も、故障することなく低温でも作動したことにより、20 日ほど予定を縮めて 11 月中に実験は終了した。また、測線がみずほルートであったことは、ルートが確立していて、各班の行動を容易にした。大型雪上車 (SM 型) で 1 日 100 km の走行が可能であり、多少天候の悪い日でも行動ができたので、このことも実験の能率をあげた要因である。こうして、11 月 26 日に全員基地に戻って、春の実験は終了した。

#### 6.2.2. 内陸における爆破

春の実験の準備は 9 月中旬より開始し、発破母線 500 m (100 m 巻 5 個) の結線、電気雷管への補助母線の取り付け、および静電気対策などを行った。10 月 13 日に、爆薬 2.4 t を西の浦の海氷上で、2 台のそりに古ぶとんを利用して積み込んだ。電気雷管は、雪上車に入れて手持ちで運搬した。雪氷ボーリング作業中は、爆薬、雷管を、ボーリング地点 (キャンプ地点) より、それぞれ反対側に 300 m 以上離して保存した。

発破前日の 11 月 11 日午後より, Shot 17 (1.4 t) の準備を開始し, まず発破母線の敷設を行った. 12 日は, 発破班 5 名, みずほ基地滞在者 3 名によって, 爆薬の開梱, 装填作業を平行して行った. 増ダイの装填は, ポリチューブを孔中に入れ, その中を落下させる方法で行ったが, 3 本落したところで, ポリチューブが破れたため, 30 m の深さで孔が詰まった. このため, みずほ基地で釣り針を作製し, 孔中の爆薬とポリチューブを釣り上げて回収した. このため, 16 時 00 分 (LT) 予定の爆破を 18 時 00 分 (LT) に変更した. 孔径 14 cm, 深さ 143 m に 1.4 t の爆薬を詰めると, 残孔長は 12 m と計算されるが, 実際の残孔長は 82.6 m あり, 薬長は 1/2 に縮んだことになる. これは, ボール紙の包装が破れて, 孔中いっぱい爆薬が詰まったときの状態とほぼ同じだと思われる. 親ダイはロープで吊りし, 静かに装填した. 発破の準備作業は 17 時 05 分に終了し, 18 時 00 分に爆破を実施した.

Shot 18 については, 発破班 5 名で同様な作業を 11 月 15 日に実施し, 100 m の孔中に 1.0 t の爆薬を装填した. この際, ポリチューブは孔の端に寄せ, 孔とチューブの間を自由落下させて装填した. 作業は 1 日で終わり, 15 時 15 分に爆破の準備が完了し, 16 時 00 分に予定どおり爆破を実施した.

大陸における爆破の際に, 静電気の問題があった. この対策は, 電気雷管の耐静電特性を良くするとともに, 耐静電服を着用して対処した. ただし, 一部の電気雷管は対静電対策と寒さのためか斉発性が悪く, 100 発掛の発破器では, テスト発破の際, 不発が生じた. このため, 発破には 500 発掛を使用した.

増ダイの装填は自由落下で行ったが, 孔径と薬径を大きくすれば, 装薬本数も減少し, 能率があがると思われる. 実際の残孔長は爆薬の形状よりも, 爆薬全体の体積が孔中に詰まったと考えた場合に近い. これは, 第 20 次隊による 62 m の雪氷孔の場合にもあてはまるようであるが, 30 m 孔による Shot 12, 16 の場合にはあてはまらなかった.

爆薬の性能については問題はなかった.

### 6.2.3. 観測

計器設置班 5 名は, 図 7 に示す 27 点に上下動地震計 1 台と, 保温箱に入れた電池ケースおよびレコーダーを設置した. 地震計は, 保温箱から約 1 m 離れた雪氷中に, 長さ 1 m のスパイクを打ち込み, そのスパイクに固定して, 約 10-30 cm 雪に埋めて設置した. 保温箱は 30-50 cm 雪に埋めた. 地震計からレコーダーへのコードは, 風 (特にブリザード) による静電ノイズを減らすため, なるべく短かく (2-3 m) し, 全体を雪に埋めた. レコーダーは, オープンリール型 20 台, カセット型 7 台を使用し, 作動 3 班の行動予定と, テープの連続稼動時間を考慮して, 組み合わせて配置した.

計器設置と同時に位置決定を行った. 位置決定は人工衛星測位装置 (JMR-1) を用い, 各地点で, status 1 が 3 個以上観測されることを原則とした. さらに観測精度をあげるため,

キャンプ地では夜間に連続観測を実施した。こうして、1日に2-3点の位置決定を行った。受信アンテナは、当初は地震計の近傍(1 m くらい)に設置したが、後には雪上車の屋根の上に設置し、雪上車から地震計までの方位と距離を測定する方法にかえた。雪上車と地震計の距離は最大 150 m 程度であり、この測定の誤差と JMR-1 による測位誤差は、ほぼ等しいと思われ、10 m 内外である。

作動班は、全測線を3区分して、3班がそれぞれの区域で9点の観測点を受け持った。各観測点において、注水電池に注水してレコーダーを作動させ、爆破の前後に合計3回の時計較正を実施した。親時計として各班が使用した時計については、爆破点の時計も含めて、人工衛星絶対時刻受信装置の出力で較正できるよう、各班が出会った時に、親時計同士の比較較正を行った。また、昭和基地から、JJY あるいはモールス符号を送信してもらい、それを各班が親時計と同時記録する方法でも、時計の狂いによる失敗のないように配慮した。

計器はおよそ順調に作動したが、レコーダー1台が、リードリレーの故障で動かなかった。またコンデンサーの劣化により、増幅器のノイズが増加したものが3台あった。その他に、レコーダー内蔵の子時計較正用出力が、保温箱の外壁に取りつけたコネクタから取り出せるようにしたが、そのコネクタ内にふたの間から入り込んだ雪が、昼間は日射のため溶け、夜間は凍結するという現象が生じ、昼間はコネクタ内で、時計の出力が短絡に近い状態になった。この時計出力の GND と、増幅器の GND には電位差があったため、時計の出力が増幅器に回り込んで、信号に重なるということが、半数以上の観測点で発生した。

また、計器の撤収後に使用済の亜鉛電極から発火した。その原因は、廃液を十分に電極から取り去らなかったため、電極を捨てた袋の中で両極端子部分が短絡状態となり、さらに袋が破損して酸素が供給され、反応が進んだためであろう。この火災は、撤収時に外気温  $-20^{\circ}\text{C}$  以下で発生し、レコーダー数台が焼け、そのうち2台は使用不能になった。また、レコーダー中の記録済テープ1巻がこのために消磁した。

### 6.3. 夏の人工地震

#### 6.3.1. 行動概要

1981年1月4日より19日まで、16日間の夏季オペレーションとなった。作動班は春とほとんど同じ編成で、計器の作動、撤収を行ったが、その中に2名の第22次隊員が加わった。1月10日までに作動と時計の較正を行い、12日に爆破を実施した。時計の較正は、各点とも爆破の前後に合計3回行った。

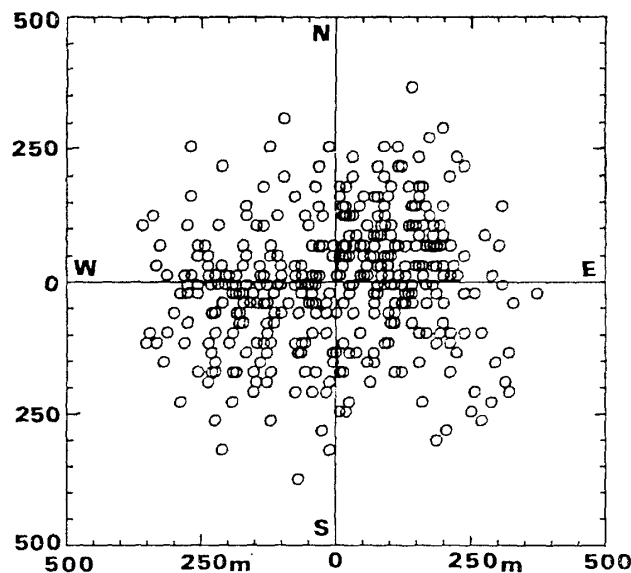
爆破は、当初予定したオングル海峡での実施が、海氷状況のため不可能になり、急きょ「ふじ」碇泊地付近に切りかえて実施した。爆破点は、図7に示されている (Shot 19)。発破と爆破時刻観測のため、2名の隊員が「ふじ」に行った以外は、「ふじ」乗員および第22次隊員によって爆破は実施された。

天候にも恵まれ、爆破予定日が1日延びた以外は、すべて順調にすすんだ。12日の爆破実施後、16日までに時計の校正、撤収を実施し、全員 S16 地点に帰着した。その後、18日にヘリコプターで基地に戻って、この測線における実験は終了した。

### 6.3.2. 海中における爆破

発破地点は、「ふじ」碇泊地から約 3 km 離れており、氷厚 85 cm、水深 220 m の定着氷上であった。1月4日に器材の準備を開始した。海氷の作孔は、5-6 名で2日間を要し、2.8 m × 3.0 m の孔をあけた。爆薬はヘリコプターでスリング輸送し、他の器材は、スノーモービルとエアクッション艇を使用して運んだ。1月12日に、約 3 km の発破母線（平行ビニール線 500 m 巻6巻）を敷設し、午後、11 名で爆薬セットの投入を行った。木材のころを使ってそろばんを作り、その上に爆薬をセットにして固縛し、てこを使って人力で海中に投下した。約 3 t の爆薬に親ダイ3本を使用し、浮きには3本を組みにしたドラム缶を4組用いた。

点火と爆破時刻の観測は、「ふじ」船上で行った。点火時刻は、通信時間と観測点側で風が弱まる時間を考慮して、18時00分 (LT) とした。11日に一応準備は完了していたが、天候がやや悪化したため、12日に実施した。



LAT  $68^{\circ} 47.787' S \pm 121 m$   
 LON  $38^{\circ} 49.759' E \pm 159 m$

図 9 NNSS 人工衛星測位によって求めた「ふじ」(Shot 19) 位置のばらつき  
 Fig. 9. Scatter of the location of the icebreaker FUJI determined by NNSS satellite surveying. The mean latitude and longitude of the location which are taken as the origin of the figure are indicated below with their standard deviations. As the location of Shot 19 is derived from the location, the scatter shows the error of the shot point.

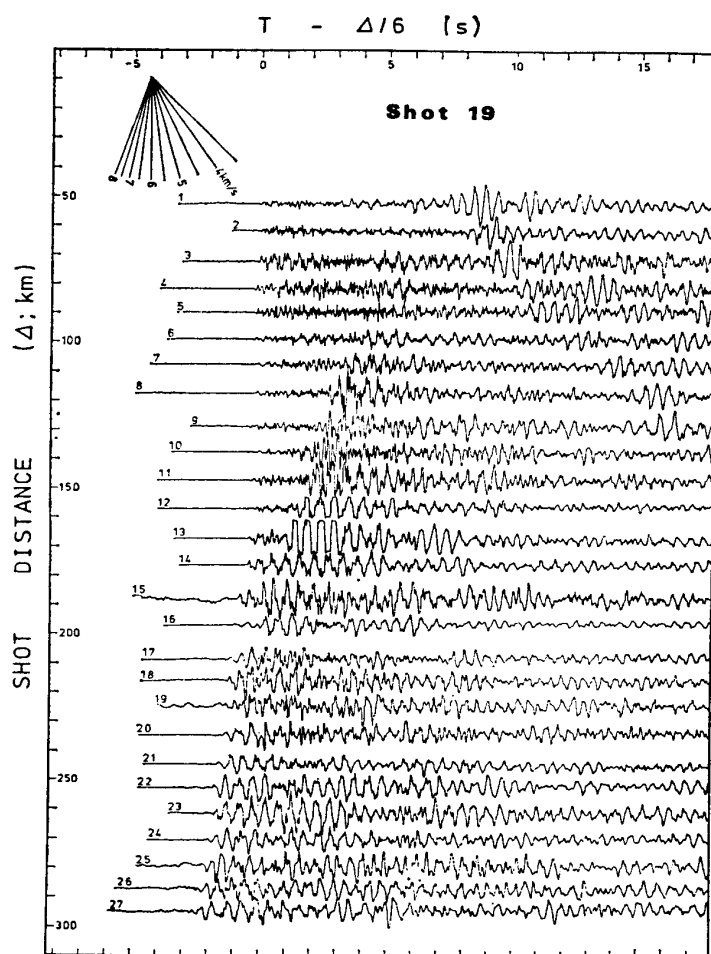


図 10 Shot 19 の地震波動記録

Fig. 10. Record section of Shot 19. Numerals in each trace show the station number in Fig. 7.

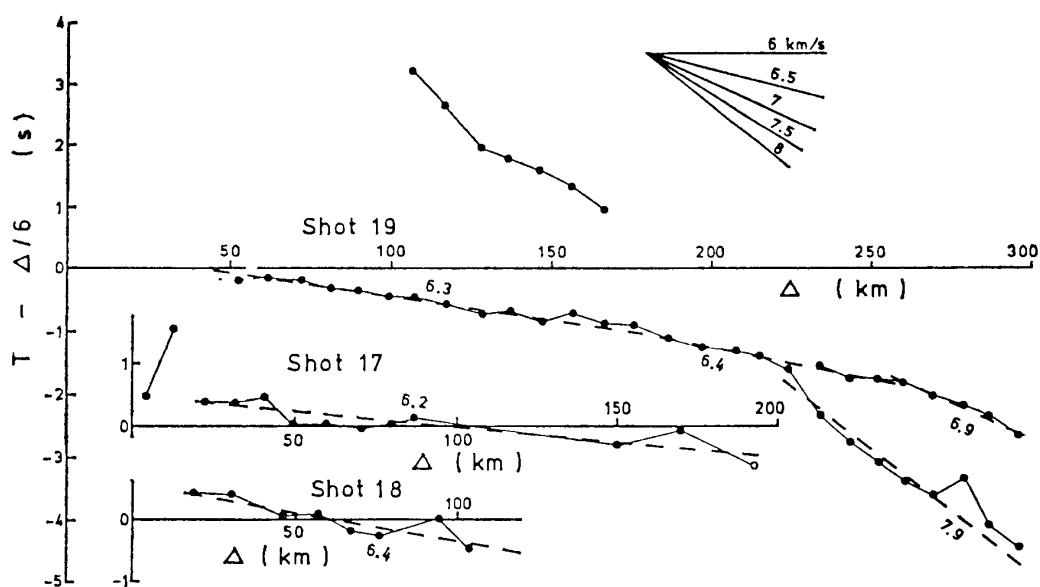


図 11 Shot 17-19 の走時図，図中の数字はみかけ速度である

Fig. 11. Reduced travel-time plots for large explosions. Numerals attached to dashed lines show the apparent velocities in km/s.



### 6.3.3. 観測

レコーダーのみを、基地からヘリコプターで S16 地点に輸送し、春の実験の第 2 段階とほとんど同様な行動を、作動 3 班が行い、爆破地震動の観測を実施した。注水電池に液もれがあって、使用不能になった観測点では、電池を 1 個だけ使用した。時計の較正は爆破の前後に合計 3 回実施し、爆破終了後に全計器を撤収した。

爆破点位置は、「ふじ」搭載の人工衛星受信装置で船位を決め、そこからの方位と距離を測定して決定した。この衛星測位装置は、3.3.2. で述べた時刻の受信装置とほぼ同仕様のもので、400 MHz 1 波のみを用いているので、精度はよくない。したがって、多数のデータの平均をとることで位置決定をした。図 9 に、用いた 407 個のデータのばらつきを示す。図 9 の中心が船位である。ただし、全データは 451 個あり、その中から標準偏差の 2 倍以上離れるデータは省いて、決定したものである。

### 6.4. 観測結果

図 10 に、Shot 19 のレコードセクションを示す。時間軸（横軸）は、爆破点からの距離を 6 km/s で割った値を、各々のトレースの時刻から引いた **reduced travel-time** を用いている。図 11 には同様に、Shot 17, 18, 19 の走時図を示す。これらの結果については、今後さらに解析が必要であるが、一応の結果は IKAMI *et al.* (1983) に発表されている。図 11 から次のようなことがわかる。震央距離 ( $\Delta$ )、約 220 km 以遠では  $p_n$  (モホ面屈折波) がみられ、そのみかけ速度は、7.9 km/s である。また  $\Delta=100-170$  km でも後続波として、モホ反射波と思われる波がみられる。上部地殻は 6.0-6.4 km/s で、深くなるほど速度が速くなる傾向があるようである。下部地殻については、初動として表われず、マスクされているが  $\Delta=260-300$  km の後続波は 6.9 km/s を示している。

## 7. あとがき

第 20 次隊にひき続いて、第 21 次越冬隊で実施した人工地震による地殻構造調査の概要を述べた。これらのデータの解析については、続報する予定である。

春の人工地震実験の際、15 名の隊員が直接大陸で 2 週間ほど実験に参加し、4 つの独立の旅行隊として行動し、さらに航空機による支援、通信など、基地在住の隊員の支援も必要であった。その間、基地内での観測の維持は小人数で続けなければならず、第 21 次隊の全隊員が人工地震の実験を実施したと言っても過言ではない。今後、同様な実験を実施する場合は、さらに十分な準備と、人力を省く工夫が必要であると思われる。発破孔掘削のための雪氷ボーリングは、特に過酷な作業であった。ボーリングのパワーアップも必要であろう。

今回のデータによって得られる地殻構造は、1 つのモデルとして、重力、アイスレーダーなどの結果とあわせて、広範囲の概略的な地殻構造の推定に利用されることができる。ただ

し、他の地域では別の構造が見られる場合が多いので、他の地域への適用には限度があり、他の測線における実験が必要になると思われる。その際、岩盤地形と重力が同時に測定されることが望ましい。また、今回の結果、モホ反射波が観測されているので、反射法による探査も考えられる。観測方法については、無線の利用が検討されるべきであろう。

## 謝 辞

人工地震の実験を、直接、間接に支援していただいた第 21 次越冬隊の全隊員の方々に、心から感謝の意を表します。特に、川口貞男越冬隊長には、全実験を率先して推進していただいた。また、白石和行隊員には、この実験の重要な部分である、雪氷ボーリングを担当していただくとともに、種々のアドバイスと支援をしていただいた。記して感謝の意を表します。

Shot 19 の実施の際、急ぎょ変更されたオペレーションへの支援を快諾された根井繁「ふじ」艦長ほか乗員の方々に厚くお礼申し上げます。また、この際、第 22 次隊員の方々にも多大なる御支援を受けた。吉田栄夫隊長はじめ隊員の方々に謝意を表します。

この実験の計画段階から、国立極地研究所地学専門委員として、種々の助言をいただいた浅田敏、浅野周三、青木治三、高木章夫の各委員の方々に深く感謝致します。

なお、この研究は、東南極基盤構造研究計画（代表者、永田武国立極地研究所長）の一環として実施された。

## 文 献

- BENTLEY, C. R. (1973): Crustal structure of Antarctica. *Tectonophysics*, **20**, 229-240.
- BENTLEY, C. R. and CLOUGH, J. W. (1972): Antarctic subglacial structure from seismic refraction measurements. *Antarctic Geology and Geophysics*, ed. by R. J. ADIE. Oslo, Universitetsforlaget, 683-691.
- 藤原健蔵 (1971): リュツォ・ホルム湾における測深と氷蝕大陸棚の地形. 南極資料, **41**, 81-103.
- 伊神 輝・一ノ瀬洋一郎・原田道昭・神沼克伊 (1980): 南極における人工地震観測の概要. 南極資料, **70**, 158-182.
- IKAMI, A., KAMINUMA, K. and ICHINOSE, Y. (1981): Upper crustal structure of Sôya Coast, Antarctica, revealed by explosion seismology. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **71**, 58-63.
- IKAMI, A., ITO, K., SHIBUYA, K. and KAMINUMA, K. (1983): Deep crustal structure along the profile between Syowa and Mizuho Stations, East Antarctica, revealed by explosion seismic experiments (abstract). *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **28**, 43.
- JMR INSTRUMENTS INC. (1977): The JMR-1 Doppler Survey Set, Description and Application. Chatsworth, Cal., 24 p (Document No. JMR 73288-3).
- KOGAN, A. L. (1972): Results of deep seismic sounding of the earth's crust in East Antarctica. *Antarctic Geology and Geophysics*, ed. by R. J. ADIE. Oslo, Universitetsforlaget, 485-489.
- KURININ, R. G. and GRIKUROV, G. E. (1982): Crustal structure of part of East Antarctica from geophysical data. *Antarctic Geoscience*, ed. by C. CRADDOCK. Wisconsin, Univ. Wisconsin Press, 895-901.
- 森脇喜一 (1974): 昭和基地付近の海底地形—第 15 次越冬隊・地理部門報告 1—. 南極資料, **54**, 101-115.
- NARUSE, R. (1978): Surface flow and strain of the ice sheet measured by a triangulation chain in

- Mizuho Plateau. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 7, 198-226.
- NARUSE, R. and YOKOYAMA, K. (1975): Position, elevation and ice thickness of stations. JARE Data Rep., 28 (Glaciol.), 7-47.
- OMOTO, K. (1976): Subglacial geomorphology of Mizuho Plateau and around Yamato Mountains, East Antarctica. Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 7 (Geogr.), 26, 47-99.
- SHIBUYA, K. and KAMINUMA, K. (1982): Utilization of an NNSS receiver in the explosion seismic experiments on the Prince Olav Coast, East Antarctica 1. Recovered UTC. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), 76, 63-72.
- SHIBUYA, K., ITO, K. and KAMINUMA, K. (1982): Utilization of a NNSS receiver in the explosion seismic experiments on the Prince Olav Coast, East Antarctica 2. Positioning. Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), 76, 73-88.
- SHIMIZU, H., YOSHIMURA, A., NARUSE, R. and YOKOYAMA, K. (1978): Morphological feature of the ice sheet in Mizuho Plateau. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 7, 14-25.
- SUZUKI, Y. and SHIRAISHI, K. (1982): The drill system used by the 21st Japanese Antarctic Research Expedition and its later improvement. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 24, 259-273.
- やまと・ベルジカ旅行隊 (1981): 第 20 次南極観測隊やまと・ベルジカ旅行報告. 南極資料, 73, 210-245.

(1983 年 3 月 14 日受理; 1983 年 5 月 11 日改訂稿受理)