

—報告—  
Report

## 投下型地震計（ペネトレータ）の南極・みずほ高原での試験観測 —第43次夏隊報告—

松島 健<sup>1</sup>・山下幹也<sup>2</sup>・安原達二<sup>3</sup>・堀口 浩<sup>3</sup>・宮町宏樹<sup>4</sup>・  
戸田 茂<sup>5</sup>・高田真秀<sup>6</sup>・渡邊篤志<sup>7</sup>・渋谷和雄<sup>8</sup>

### Observation tests of the Antarctic penetrator on the Mizuho Plateau in JARE-43 summer operation

Takeshi Matsushima<sup>1</sup>, Mikiya Yamashita<sup>2</sup>, Tatsuji Yasuhara<sup>3</sup>, Koh Horiguchi<sup>3</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>4</sup>,  
Shigeru Toda<sup>5</sup>, Masamitsu Takada<sup>6</sup>, Atsushi Watanabe<sup>7</sup> and Kazuo Shibuya<sup>8</sup>

(2003年1月20日受付; 2003年5月1日受理)

**Abstract:** We have developed an Antarctic penetrator that is applicable to seismic explosion experiments along a difficult traverse route on a continental ice sheet with crevasses. In the 43rd Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-43, 2001–2002) seismic explosion experiments on the Mizuho Plateau, in East Antarctica, we equipped 22 penetrators for seismic observation. However, due to electrical trouble, we could not apply the penetrators to actual observation. Then, we carried out a running test of the penetrators and acquired much valuable data that cannot be obtained in the domestic environment in Japan, such as the declination angle of a body intruding into the Antarctic ice sheet, impact shock, and daily change of temperature of the body in the snow. These data are not only useful for development of the Antarctic penetrator, but also for development of touchdown-type physical observation equipment for use in Antarctica.

<sup>1</sup>九州大学大学院理学研究地震火山観測研究センター。Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, Shinyama 2, Shimabara 855-0843.

<sup>2</sup>総合研究大学院大学極域科学専攻。Department of Polar Science, The Graduate University for Advanced Studies, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

<sup>3</sup>朝日航洋株式会社。Aero Asahi Corporation, 2-49-4, Minami-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-0033.

<sup>4</sup>鹿児島大学理学部地球環境科学科。Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, 1-21-35, Kourimoto, Kagoshima 890-0065.

<sup>5</sup>愛知教育大学教育学部地学教室。Department of Earth Sciences, Faculty of Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542.

<sup>6</sup>北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター。Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita-10, Minami-8, Kita-ku, Sapporo 060-0810.

<sup>7</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻。Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581.

<sup>8</sup>国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

**要旨:** 南極氷床上のクレバス帯等の、地上からは到達困難な地域での人工地震観測を目的とした投下型地震観測装置（南極ペネトレータ）を開発し、第43次日本南極地域観測隊で実施する東南極みずほ高原における人工地震探査で使用するために、22本のペネトレータを昭和基地に持ち込んだ。しかし、開発の遅れに伴う国内試験の不足から種々の不具合が発生し、今回は本観測での使用をあきらめざるを得なかった。当初の目的は果たすことができなかったが、国内では得られない環境でのペネトレータ投下実験を行い、投下姿勢、着地衝撃力、温度変化等の貴重なデータを得るとともに、南極内陸部での実際のヘリコプター運用への知見を得ることができた。これらの成果はペネトレータ型地震計の改良のみならず、今後の各種投下型観測機器の開発・製作に多いに役に立つものと考えられる。

## 1. はじめに

南極ペネトレータとは、南極氷床上のクレバス帯等の地上からは到達困難な地域に上空から投下され、人工地震を観測したのち、上空のヘリコプターにデータを送信するシステムである。同様な投下型地震観測システムは、宇宙科学研究所が開発を進めている月面ペネトレータ (Mizutani, 1995)、火山地域に投下設置する火山観測用ペネトレータ (清水ら, 1995) などがある。最近では火山観測用ペネトレータを改良し、無人ヘリコプターと組み合わせた防災用ペネトレータシステムが気象庁により開発されている。

南極ペネトレータは1989年から文部省科学研究費補助金の交付を受けて開発研究がはじめられ、これまでに数多くの開発試験を実施してきた（たとえば、渋谷ら, 1991, 1992, 2000; 松島ら, 2001 など）。当初の計画では第43次日本南極地域観測隊（43次観測隊）が実施する東南極みずほ高原における人工地震探査（宮町ら, 2003）において使用する予定であったが、機器に不具合が発生したため、実際の人工地震観測では使用せず試験観測を行った。本論では、この南極地域での投下および運用試験観測の結果を報告する。

## 2. ペネトレータ仕様

開発されたペネトレータは全長 94.5 cm、直径 12 cm のアルミ製で、空中姿勢の安定化のために、グラスファイバー製の円筒型尾翼が取り付けられている。先端部に可動コイル型の上下動地震計（固有周波数 3 Hz）が内蔵されており、その後ろに 7V 132 Ah のスーパーリチウム電池が組み込まれている。さらにその後ろに増幅 A/D 基盤、CPU メモリ基盤、時計基盤からなるエレクトロニクス部があり、尾部に無線モデム（1.2 GHz 帯、出力 10 mW）と送受信アンテナが設置されている。総重量は 14.5 kg である（図 1, 図 2）。

地震計出力信号は前置増幅器（10 倍、100 倍、1000 倍選択可能）で増幅されたのち ±1.2 V 16 bit 100 Hz サンプリング 1 チャンネルで A/D 変換される。2 MB のデータ記憶容量を 48 エリアに分割することで、1 エリアあたり 60 秒間記録するが可能である。第 43 次的人工地震観測では 1 日 2 回の観測帯を設定しているため、24 日分の記録取得が可能である。

小型ヘリコプター（アエロパシアル式 AS350 クラス）の後部座席に 6 本のペネトレータ

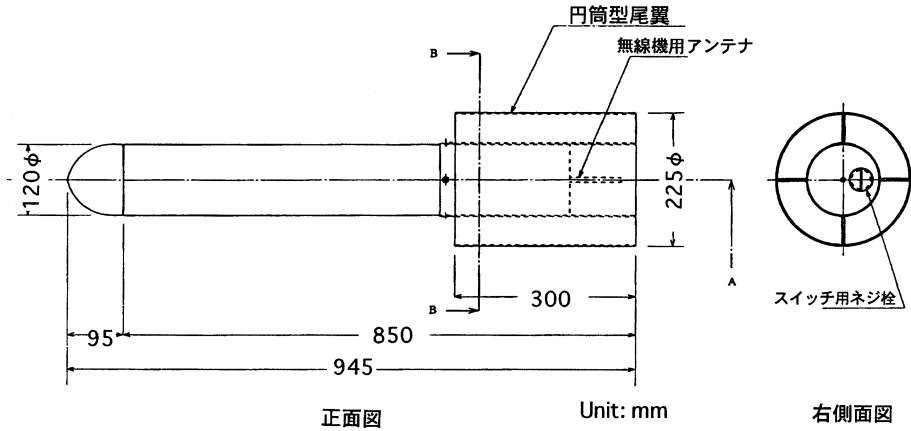


図1 ペネトレータ平面図  
 Fig. 1. Schematic plan view of the Antarctic penetrator.

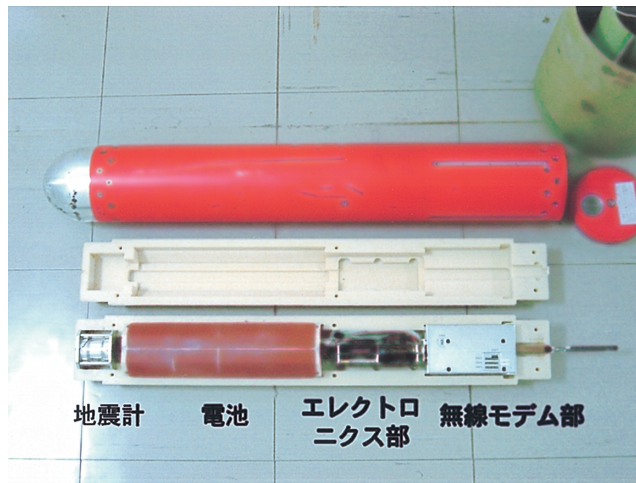


図2 開発された南極ペネトレータの内部  
 Fig. 2. Inside of the Antarctic penetrator. From left to right, seismometer, super lithium batteries, electric unit, radio modem unit.

を搭載することが可能で、ヘリコプターの後部座席床面の写真撮影用孔（直径 24 cm）に取り付けられたシューターと呼ばれる円筒から投下する。

着地後ペネトレータは、無線リンクにてヘリコプター内に設置された GPS 時計との時刻同期を行い、観測スケジュールファイルを受信したのち、観測時間まで待機状態に入る。人工地震実験終了後、再度ヘリコプターにてペネトレータ上空に赴き、観測波形データを無線で回収するとともに、ペネトレータ内部時計をヘリコプターの GPS 時計を使って校正する。全 48 エリアのうち、人工地震発破が記録されている 8 エリア分のデータを回収するには

表 1 ペネトレータ仕様

Table 1. Specifications of the Antarctic penetrator.

全体	全長 945 mm 外径 225 mm $\phi$ 総重量 14.5 kg
外筐体	アルミ製 120 mm $\phi$ 厚み 6 mm 赤色ウレタン塗装仕上
円筒羽	GFRP 製 外径 225 mm $\phi$ 長さ 300 mm 板厚 2 mm
内部胴本体	ABS 製 106 mm $\phi$
地震計	アカシ製 V241-FV 型 固有周波数 3 Hz 減衰定数: 0.6 電圧感度 (20 Hz): 2.3 V/(cm/s) 耐衝撃性: 5000 G
電池	タディラン製リチウム単一型 16 本構成 (2S8P) シリコン成形 7.0 $\pm$ 0.2 V (+25°C) 132 Ah
増幅器 A/D 基盤	周波数: 1-50 Hz 入力インピーダンス: 200 k $\Omega$ 以上 チャンネル数: 1 ch 分解能: 16 bit サンプリング周波数: 100 Hz 最大入力: $\pm$ 1.2 V
CPU メモリ基盤	CPU: Z80 16 MHz メモリ 2 MB エリア数 48 分割
時計基盤	同期精度 UTC に対して $\pm$ 1 ms 以内 TCXO 制御: -6 $\sim$ -20°C
無線送信部	1.2 GHz 帯 (特定小電力無線機) 出力: 10 mW 直接 FSK 変調 占有帯域幅: 32 kHz 以下 伝送速度 19.2 kbps 1/4 波長ホイップアンテナ
無線受信部	1.2 GHz 帯 受信感度: -113 dbm 最大 復調: ダブルスーパーヘテロダイン 受信感度: 見通 300 m 1/4 波長ホイップアンテナ

理想的な電波状態で 4 分 18 秒かかるため、ヘリコプターは数分間ペネトレータ上空 (直線距離 300 m 以内) をホバリングまたは旋回飛行している必要がある。なお、投下設置されたペネトレータ本体は観測終了後回収せず、使い捨てにする。表 1 にペネトレータの仕様を示す。

### 3. 南極地域での実験

#### 3.1. 実験概要

東南極みずは高原で実施される人工地震観測 (宮町ら, 2003) で使用するため、22 本のペネトレータと 3 本の投下実験用のダミーペネトレータを製作した。しかしながら、開発・製造の遅れから十分な国内評価試験を実施できないまま 2001 年 10 月末に砕氷艦「しらせ」に積載され南極地域に輸送された。

2001 年 12 月末、昭和基地に到着後、人工地震観測での使用に向けて試験を行ったが、不具合が多く発生し、本観測をあきらめざるを得なかった。このうち最大の不具合は、電池の逆流防止回路にあり、「しらせ」での輸送途中でも微弱な電流が常時流れ続けた結果、昭和基地到着時にはスーパーリチウム電池がほぼ消耗した状態になっていた。数本のペネトレータについては国内の試験で使用した中古電池への交換作業を行い回復に努めたが、他に低温障害が発生し、ソフトウェアの不具合もあって、1 地点のみ人工地震波形を取得できたにすぎない。

ペネトレータの設置点地図を図 3 に示す。S16, S30, SP4, P01-06 の各点でヘリコプターからの投下設置実験を行った。P07-16 および S16, S30, SP4 においては雪面に掘った穴にペネトレータを差し込んで設置し、人工地震観測の運用の試験も行った。

人工地震観測という当初の目的は果たすことができなかったが、種々の投下実験を行い、

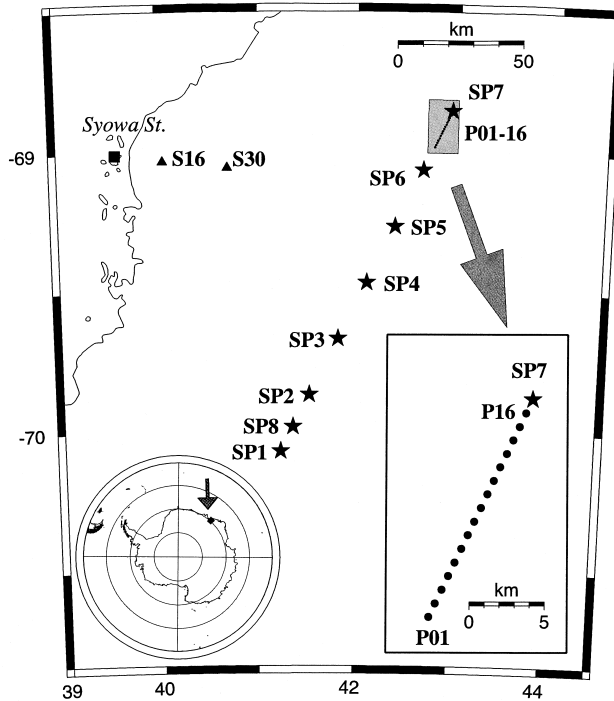


図3 南極みずほ高原での実験の地図。星印は43次人工地震実験でのShot Pointを示す。S16, S30, SP4, P01-16の各点でペネトレータの実験を実施した。

Fig. 3. Map of the Mizuho plateau in East Antarctica, showing the running test sites of the penetrators, S16, S30, SP4, P01-16. Stars indicate shot locations in the JARE-43 experiment.

以下に述べる多くの知見を得ることができた。

### 3.2. 投下高度と着地姿勢

ヘリコプターからのペネトレータ投下を、ダミーペネトレータの投下を含めて18回行った。ダミーペネトレータも内部には錘をいれ、ペネトレータとほぼ同じ重量および重心となっている。着地後の状態については、地上の雪上車チームやヘリコプターを近傍に着陸させることで確認を行った（図4, 5, 6）。ペネトレータの着地姿勢の測定結果を表2に示す。なお、1月23日投下のDmy 15号機は雪面に貫入後に尾翼が破損離脱し、ペネトレータ本体は更に深く潜り込んだため発見できなかった。そのため尾翼の位置から推定して、ペネトレータの先端深度を175 cm以上とした。また参考のため、ヘリコプターキャビン内の天窓に取り付けたハンディーGPS（Garmin製eTrex）に記録された投下時の対地速度も記した。貫入深度は雪面からペネトレータの先端までの深度である。

対地高度は、ヘリコプターの電波高度計が雪面反射のためホバリング時には正確な値を示



図4 ヘリコプターから投下されたペネトレータ  
Fig. 4. Penetrator released from a hovering helicopter.

さなかったことから、ハンディー GPS に記録された高度差（投下時高度—着陸時高度）を用いた。GPS 単独測位では高度に 20m 以上の誤差が出る場合がある。しかし、今回の場合、ホバリング時および着陸時の測定の時刻の差が小さく、またヘリが同じ方位（東方向）に向いている時に測定し、測位に使用される GPS 衛星の配置が大きく変化しないことから、両者の高度差の精度は数 m 程度と考えられる。電波高度計はヘリコプターのテールブームに設置された送受信装置から C バンドのマイクロ波を出して、反射点までの距離を求める装置である。ホバリング時は雪面に対してほぼ垂直の電波入射となるため、雪下深部からの反射波が強く混入し、高度値がまったく一定の値を示さないのに対し、飛行時はヘリコプターが前傾姿勢をとるため、マイクロ波が雪面にたいして斜め入射となり、雪面表面からの反射波（散乱波）を最も強く受信可能で、安定した高度表示がなされ则认为される。

使用された地震計は、月面ペネトレータや火山ペネトレータでも使用されている動コイル型速度計（アカシ製 V241-FV）である。この地震計は軸方向に 5000 G の加速度を加えても破





図5 掘り出し中のペネトレータ  
Fig. 5. Penetrator body under excavation.



図6 回収されたペネトレータ  
Fig. 6. Recovered penetrator

損しないことが分かっており、耐衝撃性には問題がない。しかし、南極ペネトレータでは構造の単純化・低価格化を目指したため、ペネトレータが傾いて停止しても地震計軸が垂直になるようにするジンバル装置を取り付けていない。したがって、正常な地震波形を記録するためにはペネトレータの貫入角度を8度以内にする必要があり、大振幅の波形も記録するた

表 2 南極での投下実験結果

Table 2. Fall conditions of the penetrators observed in Antarctica.

実施日	投下時刻 (LT)	号機	衝撃 センサ	投下 地点	対地 高度	対地速度	先端 深度	着地傾度	地上風 気温
Dec 27 2001	1057:26	Dmy A	2 個	S16	100 m	W1 m/s	115 cm	14 度	NE8 m/s -4.5°C
	1101:51	Dmy B	1 個	S16	74 m	E1 m/s	75 cm	45 度	
	1108:27	Dmy C	1 個	S16	138 m	E2 m/s	95 cm	7 度	
Jan 03 2002	1452:53	Dmy A		S30	104 m	W2 m/s	115 cm	未測定	Calm
	1459:41	Dmy B		S30	105 m	W2 m/s	90 cm	約 45 度	
	1505:25	19		S30	101 m	SW1 m/s	140 cm	未測定	
Jan 06	0954:45	10		P01	150 m	SE3 m/s	115 cm	30 度	E8 m/s -14°C
	1004:47	08		P02	149 m	W1 m/s	125 cm	0 度	
	1013:58	07		P03	126 m	SW2 m/s	120 cm	20 度	
	1020:39	22	2 個	P04	134 m	SE2 m/s	105 cm	20 度	
	1028:56	17		P05	149 m	W3 m/s	135 cm	15 度	
	1036:42	13		P06	200 m	SE1 m/s	145 cm	0 度	
Jan 16	0924:02	21		SP4	268 m	W1 m/s	160 cm	14 度	E7 m/s
Jan 22	0959:17	Dmy 05	2 個	S30	301 m	E6 m/s	145 cm	13 度	E8 m/s
	1017:34	Dmy 03	2 個	S30	466 m	E6 m/s	170 cm	4 度	
	1035:51	Dmy C		S30	565 m	E1 m/s	180 cm	4 度	
Jan 23	1336:47	18		S30	151 m	E2 m/s	135 cm	3 度	Calm
	1348:24	Dmy 15		S30	290 m	W5 m/s	175 cm 以上	未測定	

めには 4 度以内が望ましい。

国内のこれまでの投下実験では対地高度 150 m 以上から投下すれば、ほぼ垂直に貫入することが分かっていた。しかし、これは風がほとんどない場合の実験例であり、強い風が吹く大陸氷床では対地高度 150 m では不十分であることが今回の実験から分かった。図 7 にペネトレータの投下高度に対する着地傾度の関係を示す。秒速 7-8 m の地上風が吹く中で、ペネトレータを傾度 4 度以内に着地させるためには、対地 400 m 以上の高度が必要である。

図 8 にペネトレータの進行方向に対する機軸の傾斜角変化のシミュレーション計算結果を示す。このシミュレーションには Brauer *et al.* (1977) が開発したプログラム POST を改良して用い、ペネトレータの機体の空力特性 (抵抗係数・法線力係数・モーメント係数) や投下時の風向風速、ヘリコプター速度を考慮に入れた。これを見るとヘリコプターから投下されたペネトレータは、投下直後にペネトレータの進行方向に対して 30 度以上大きく傾いたあと、減衰振動をしながら着地することが分かる。現在の機体形状では、100-200 m の高度から投下では垂直貫入を期待するのは難しいといわざるを得ない。この振動を抑制するには、ペネトレータの尾翼を大きくするのが最も効率がよい。しかしながら、ヘリコプターの機体を改造せずにキャビン内からペネトレータを投下するためには直径 24 cm 以内にする必要があり、また狭いキャビン内での取り回しを考えると全長を 1 m 以内に納めざるを得ない。ペネ



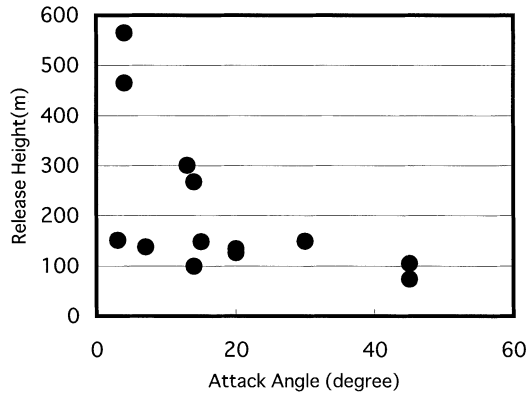


図7 ペネトレータの投下高度と貫入角度の関係

Fig. 7. Attack angle of the penetrator into the snow surface versus its release height from the helicopter.

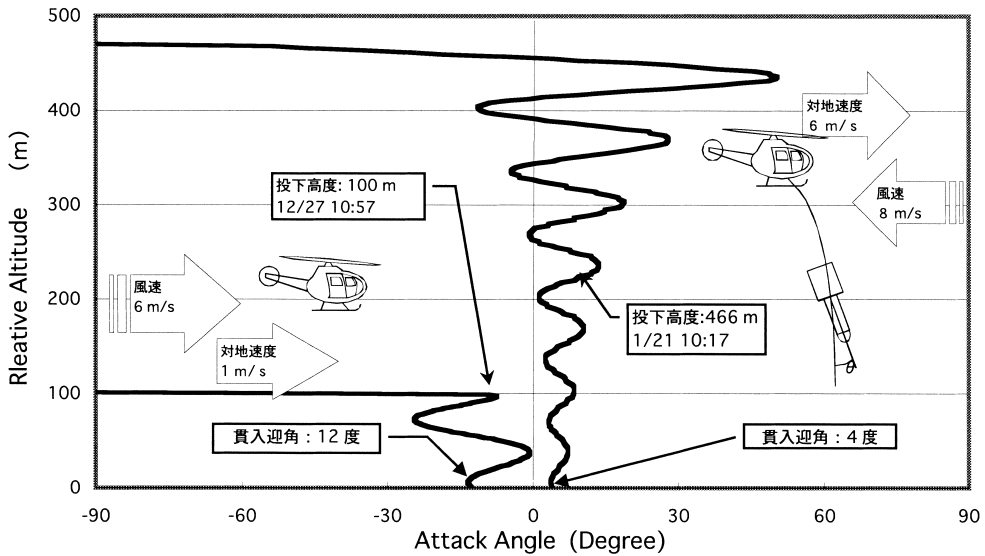


図8 投下シミュレーションより得られた対地高度466 mおよび100 mから投下したペネトレータの機軸と対地速度ベクトルのなす角度の変化

Fig. 8. Change of the body axis angle of penetrators released from relative altitudes of 466 m and 100 m using aerodynamic simulation analysis.

トレータをヘリコプター下部のフックにつり下げて投下する方式にすると、尾翼の形状に制限がなくなり、安定性が増す。しかしながらこの場合、1本投下するごとに雪面に降りてペネトレータをつり下げなければならず、離陸時には地上に整備員を待機させなければならない。またペネトレータをつり下げた状態では飛行速度が制限されるため、航続距離が短く

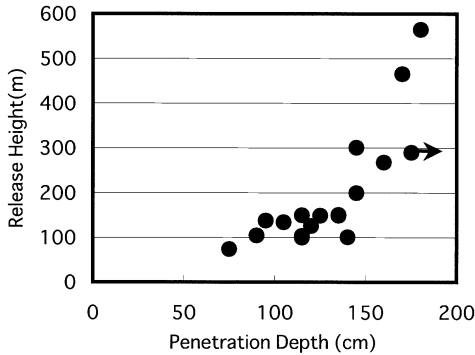


図9 ペネトレータの投下高度と貫入深度（先端深度）の関係。矢印が付いているデータは尾翼と本体が分離してしまったペネトレータのもので、先端は175 cm以上潜っていると推定される。

Fig. 9. Penetration depth into the Antarctic snow versus release height from the helicopter. The data with an arrow was obtained from the penetrator that the tail separated. It was surmised that the tip of the penetrator was in a depth of 175 cm or more.

なってしまう。さらに、切離し装置の複雑さやリリース時の安全性等の問題もある。このようなことから、南極域でのつり下げ方式の採用は難しい。

図9にペネトレータの投下高度に対する先端深度の関係を示す。対地高度290 mからペネトレータを投下した時には尾翼が破損して本体が分離してしまったので、先端深度を175 cm以上と推定し、図中に矢印で示している。ペネトレータの全長は約95 cmあるため、先端深度が95 cm以上なら本体が完全に氷床中に潜り込んだことを意味する。高高度から投下すると、現状のペネトレータの形状では、本体尾部にとりつけられた無線アンテナが雪面から70 cm以上も潜ってしまうので、無線の到達距離で不利が生じる可能性がある。このため、今後はなんらかの減速制動機構を考慮する必要がある。なお、43次越冬隊吉井隊員の昭和基地での実験によると、1.5 GHz帯を使用するGPS受信機はアンテナ上に2 mの雪の層があっても、低高度の衛星感度は多少落ちるが正常に使用可能であるという結果を得た。したがって、1.2 GHz帯を使うペネトレータの無線モデムについても、雪のかぶりによる影響を調査する必要がある。

以上のようなことから、今後のペネトレータ型地震計の設計には以下の点を考慮に入れるべきである。

1) ペネトレータ本体がどのような角度で貫入停止しても良いように、ジンバル装置が必須である。これまでジンバル装置は精密で高価なものであったが、最近樹脂製で安価なものが開発されている。

2) 着地速度を落とし、しかも姿勢を良くするためにはパラシュートの利用が有効であると考えられる。また着地前にはパラシュートを切り離す装置が必要となる。パラシュート方式による制御はミサイル開発の分野では一般的な技術であり、その流用を検討すべきである。

### 3.3. 衝撃力の測定

雪面に貫入する際の衝撃力を把握することは、機器の設計にあたって、大変重要である。

特に南極内陸部での雪面の状態を日本国内で再現することは難しいため、貴重なデータとなる。

衝撃力の測定には、衝撃センサーや鉛玉の変形を使う方法が一般的である。今回の南極地域での投下実験では簡易発色衝撃計（富士写真フイルム社製ショックセンサー Type-1-N）を一部のペネトレータの頭部または尾部に1, 2個ずつ取り付け、雪面に貫入する際の衝撃力を測定した。しかし、実際にはこのセンサーの衝撃加速度測定範囲（20-100 G）を超えてしまったため、正確な値を測定することはできなかった。また、低空から投下した場合でも、大きく斜めに貫入したもの（Dmy B, 45度）は、強いトルクがかかったため、ショックセンサー自体が破損していた。

次にペネトレータの空力特性、投下時のヘリコプター速度、風速を考慮した投下シミュレーションから得られたペネトレータの雪面貫入速度  $V_i$  と、その速度が0になった深度  $d$ （＝ペネトレータの先端深度）からペネトレータ貫入時に作用する平均衝撃加速度  $a$  を以下の式で算出した。

$$a = V_i^2 / 2d.$$

図10に投下高度と推定された平均衝撃加速度の関係を示す。この図から、高度100-600 mの範囲では、平均衝撃加速度は投下高度に比例し、高度600 mから投下した場合には、約300 Gの衝撃が加わることが分かった。空力特性を考量にいれた投下シミュレーション計算を行うと、本ペネトレータの投下終端速度は約280 m/sであり、それに達するためには約9000 m以上の高度から投下する必要がある。したがって、今回の投下実験の範囲では、ペネトレータはほぼ自由落下していることとなり、平均衝撃加速度は投下高度の平方根に比例するはず

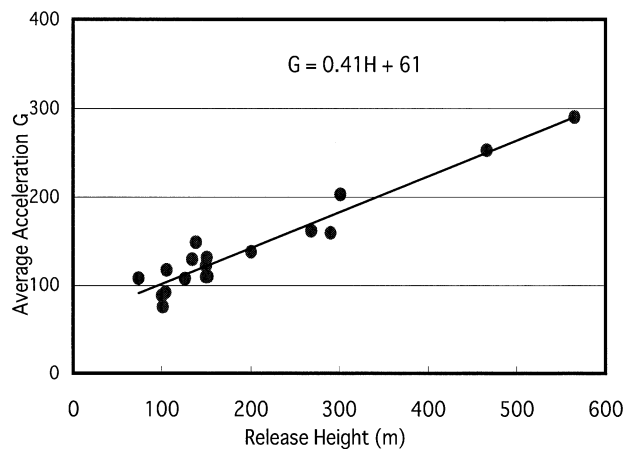


図10 投下高度に対する着地時の平均衝撃加速度

Fig. 10. Average decelerate acceleration of the penetrator in Antarctic snow versus release height from the helicopter.

である。しかし、ペネトレータが雪面に深く貫入すればするほど雪の硬度があがり抵抗力が増すため、衝撃加速度が増加し、投下高度と平均衝撃加速度が比例しているようにみえると考えられる。

砂地にペネトレータが貫入する場合、瞬間的な加速度は平均加速度の2-3倍の値になることが月面ペネトレータの実験などから経験的に知られている。南極内陸部の堅く締まった雪の場合には雪面硬度を考慮した貫入解析がさらに必要であるが、ペネトレータ設計における耐衝撃加速度として、1000 G 程度を考えておけばよいことが分かった。

### 3.4. 雪中温度変化の測定

南極のような低温下で安定した動作をする電子機器を開発するのは難しく、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の動作保証がある電子パーツは非常に高価なものになってしまう。今回作成したペネトレータの場合、 $-25^{\circ}\text{C}$ を下回ると、無線モデムが正常に動作しないことが国内での試験から分かっていた。実際の人工地震の観測ではどれくらいの温度になるか事前に把握しておくことは重要である。

人工地震発破点 SP7 の約 2 km 南西側の P15 地点 ( $68^{\circ}52'S$ ,  $42^{\circ}55'E$ , 標高 1345 m) において、雪面と深度 1 m の雪中温度測定を 2002 年 1 月 5 日~1 月 25 日にかけて実施した。温度センサーには白金温度計を使い、1 m 深の温度センサーは同地点に埋設設置したペネトレータの先端部に設置した。データは小型ロガーに 5 分間隔で記録された。

図 11 にその温度測定結果を示す。期間中の天候はおおむね良好で、雪面温度は  $-7.0^{\circ}\text{C}$  ~  $-16.6^{\circ}\text{C}$  の日変化を示している。それに対し、1 m 深では  $-13.4^{\circ}\text{C}$  ~  $-15.2^{\circ}\text{C}$  の日変化を示し

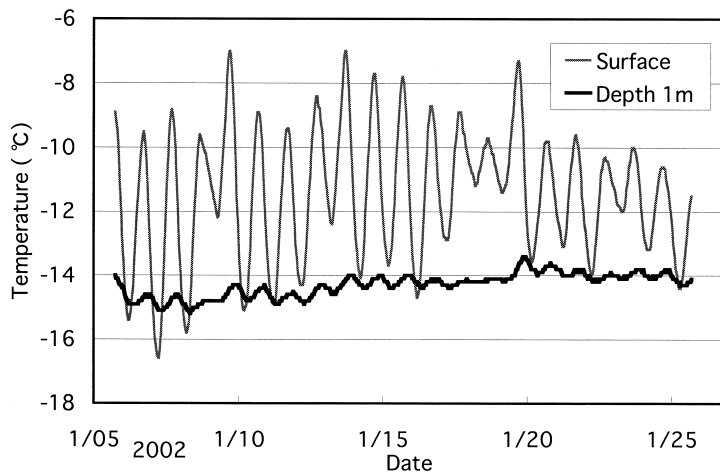


図 11 みずほ高原の標高 1345 m 地点における雪上・雪中温度の日変化  
 Fig. 11. Daily changes of temperatures of the snow surface and the penetrator body (1 m depth) observed at altitude 1345 m on the Mizuho Plateau.

ており、温度変動の振幅は1 m 深では雪面での変化の10分の1以下になっていることがわかった。また両者の日変化の位相のずれは約6時間であった。期間を通しての平均温度はそれぞれ、 $-11.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-14.3^{\circ}\text{C}$ であった。今回の人工地震測線の標高では同時期に $-20^{\circ}\text{C}$ 以下にはならないことがわかった。

### 3.5. 内陸部におけるヘリコプターの運用

43次夏隊においては、小型双発ヘリコプター（アエロスペース社製 AS355F2）1機を昭和基地をベースとして使用した。同機種は40次夏隊における西エンダビーランド調査でも2機使用されている。今期は天候に恵まれており、2、3のフライトが順延になったほかは、地吹雪状態でのフライトを実施することもなく、順調なフライトが行われた。途中引き返しは1度のみであった。内陸部はおおむね天候がよく、むしろ昭和基地周辺や大陸縁辺部の低層雲や霧で、飛行判断に悩むことが少なからずあった。

しかし、雪面以外に目標物がない内陸地域においては、一端地吹雪が強くなるとホバリング状態を保つのが非常に難しくなるため、ペネトレータの投下に支障が出るのが予想される。したがって、内陸地域では投下機器に垂直貫入を求めるのは非常に困難であろう。

またヘリコプターに搭載されている AirVHF 無線機は基本的に見通し間通信であるため、内陸に入るにつれて低高度では昭和基地との無線交信が直接できなくなる。現在の航空機運用指針では、単機運用の場合15分ごとに基地との連絡をとる必要があり、30分以上連絡がとれない場合には、救助態勢が取られることになっている。今回は昭和基地との無線交信ができない場合には地上の雪上車に HF 無線を使っての中継を依頼したが、HF 無線アンテナを展開すると雪上車は動くことができないため、双方の行動に大きな制約が生じた。雪上車が近くにいない場合には、ヘリコプターの単独運航は不可能となる。内陸部におけるヘリコプターの効率的な運用のためには、安全面も含めて2機態勢をとることが不可欠である。

## 4. ま と め

種々の不具合のため、今回はペネトレータの特徴を活かしたクレバス地域での人工地震観測という当初の目的は果たすことができなかった。しかし、その一方で国内では得られない環境でのペネトレータ投下実験を行い、投下姿勢、着地衝撃力、温度変化等の貴重なデータを得るとともに、南極内陸部でのヘリコプター運用の知見を得ることができた。これらの成果はペネトレータ型地震計の改良のみならず、今後の各種投下型観測機器の開発・製作に多いに役に立つものと考えられる。

## 謝 辞

本ペネトレータの南極地域における試験観測においては、第43次日本南極地域観測隊（西

尾文彦隊長以下 63 名) による観測協力, および砕氷艦「しらせ」(石角義成艦長以下 174 名) の乗組員による野外観測支援を受けた。またペネトレータの空力特性および投下状態解析には株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースの名出智彦氏に協力いただいた。また査読者の意見は本稿を改善に多いに役にたった。ここに記して感謝する。

## 文 献

- Brauer, G.L., Cornick, D.E. and Stevenson, R. (1977): Program to Optimize Simulated Trajectories (POST). Program summary document, NASA CR-2770.
- 松島 健・SEAL 人工地震グループ (2001): 43 次みずほ高原での人工地震探査に関連した機器開発. 第 21 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, 104-105.
- 宮町宏樹・戸田 茂・松島 健・高田真秀・高橋康博・神谷大輔・渡邊篤志・山下幹也・柳沢盛雄 (2003): 東南極みずほ高原における屈折法および広角反射法地震探査—観測概要 (第 43 次夏隊報告)—. 南極資料, 47, 32-71.
- Mizutani, H. (1995): Lunar interior exploration by Japanese lunar penetrator mission, LUNAR-A. J. Phys. Earth, 43, 657-670.
- 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ペ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ペネトレーターの開発 (2) 1990 年度経過報告. 南極資料, 36, 310-340.
- 渋谷和雄・金尾政紀・神沼克伊・小山順二・松島 健・筒井智樹 (2000): 南極ペネトレーターの開発について (総合試験). 第 20 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, 70-71.
- 清水 洋・松島 健・水谷 仁・藤村彰夫・田中 智・神沼克伊・渋谷和雄・山科健一郎・及川 純・山田功夫・鳥居龍晴・伊藤 潔 (1995): 火山観測用ペネトレータの開発—衝撃加速度の測定実験—. 地球惑星科学関連学会合同大会, 84.