

JARE-43 人工地震探査におけるスチームドリルによる発破孔掘削

渡邊篤志¹・石崎教夫²・柳澤盛雄³・宮町宏樹⁴Ice drilling for blasting boreholes in deep seismic surveys (JARE-43)
by steam type drilling systemAtsushi Watanabe¹, Norio Ishizaki², Morio Yanagisawa³ and Hiroki Miyamachi⁴

Abstract: A seismic exploration was accomplished in the austral summer of 2001–2002 by the 43rd Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-43) along a profile oblique to that held by JARE-41 on the Mizuho Plateau, East Antarctica. We used a steam type drilling system to obtain seven blasting boreholes. We spent 7 to 8 hours to make an enough depth of the hole for one shot point. The holes were 35 to 40 cm in diameter and 23.5 to 28.7 m in depth. The average drilling speed was 3.25 m/hr.

要旨: 第43次日本南極地域観測隊 (JARE-43) は、JARE-41 に引き続いてみずほ高原にて人工地震探査実験を実施した。JARE-41 と同様に、7カ所の発破孔の掘削にはスチーム噴出式氷床掘削ドリルを用いた。掘削作業時間は、直径35–40 cm、深さ23.5–28.7 mの発破孔を掘削するのに、7–8時間であった。平均掘削速度は3.25 m/hrであった。

1. はじめに

日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition, 以降 JARE と略す) では、「東南極リソスフェアの構造と進化研究計画 (Structure and Evolution of East Antarctic Lithosphere)」(金尾, 2001) の一環として、みずほ高原における人工地震探査実験を2度実施した。1999–2000年 (JARE-41) にはみずほルートを探査測線として (宮町ら, 2001), 2001–2002年 (JARE-43) では JARE-41 の探査測線に斜行する 151 km の探査測線を展開して (宮町ら, 2003) 大規模な人工地震探査実験が実施された。

¹九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, Fukuoka 812-8581.

²(財) 地球・人間環境フォーラム。Global Environmental Forum, 1-9-7, Azabudai, Minato-ku, Tokyo 106-0041.

³国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

⁴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.

人工地震探査実験では、制御震源としてダイナマイトを用いるため、装薬・発破させる孔を掘削する必要がある。この発破孔の掘削ではコアを採取する必要がないことや、実験が時間的に制限されているために掘削地点間の移動や機器の設置・撤収や操作の容易さが求められることから、JARE-41, -43 とも、発破孔掘削にスチーム噴出式氷床掘削ドリル (以降スチームドリルと略す) を使用した。本論文では、JARE-43 におけるスチームドリルの運用について報告する。

2. 発破孔掘削

2.1. 掘削機器

JARE において、スチームドリルは内陸基地において生活廃水処理孔掘削等に使用するための設営装備として開発・利用されてきた (例えば、石沢ら, 1990)。JARE-43 では、JARE-41 での経験に基づいて改良した機器を使用した。主な改良点は、以下の 3 点である：1) スチームゼネレーター造蒸気能力の 25 kg/hr から 40 kg/hr への増強。2) $\phi=200$ mm の掘削スカートの新造。3) スチームゼネレーター用バーナーへの手動点火スイッチの追加。2001 年 4 月には、JARE-41, -43 人工地震探査実験メンバーにより、富山県室堂平において試験掘削を実施した。また、同年 9 月には、JARE-43 人工地震探査実験メンバーにより、改良したスチームドリルの動作試験を実施した。その構成と仕様は表 1 の通りである。

図 1 にスチームドリルの模式的な構成図を示す。スチームドリルは、雪を融かして水にする造水器、水を高温高压の水蒸気にするスチームゼネレーター、三脚を経て孔底へ水蒸気を輸送するホース、水蒸気を噴出する掘削ノズル等により構成されている。図 2 は、専用幌橋内に設置されたスチームドリルである。

スチームゼネレーターには水位センサーが装備されており、水位の上下により自動的に給水ポンプがスチームゼネレーターに送水し、一定の水位が保たれる。また、スチームゼネレーターには圧力センサーも装備されており、水蒸気圧が 5 kg/cm^2 を越えるとバーナーが自動停止し、 4 kg/cm^2 を下回るとバーナーが自動着火する。もし、何らかの原因で 5 kg/cm^2 で自動停止しなかった場合は 6 kg/cm^2 で安全弁が作動する。実際に、JARE-43 では、この安全弁が数回作動した。

ホースの自動繰り出し装置は、モーターに減速機を介してロープリールが付いたものであり、 $0.15\text{--}15 \text{ rpm}$ の範囲で連続的に回転数を変えることができる。ロープの先端をホースリール側のホースにプルージックループで固定してロープを繰り出し、結び目が滑車に近づいたら結び目をホースリール側に移動させることで、半自動的にホースをゆっくりと延ばすことができる。

表1 スチームドリルの主な機材とその仕様

Table 1. Major equipments of steam type drilling system and specifications.

機材	仕様	
スチームゼネレーター	最高使用圧力 常用圧力 伝熱面積 実際蒸発量 バーナー	6 kg/cm ² 5 kg/cm ² 1.9 m ² 50 kg/hr (給水温度 5℃にて) ガンタイプ式 OH-40A 特灯油 AC-100V
造水器	造水能力 バーナー	80 kg/hr (雪温 -20℃にて) ガンタイプ式 SL-1N 灯油 AC-100V
給水ポンプ	形式 揚水量 モーター	カスケード式 10-LPM510 60 L/hr 2 極コンデンサー式 AC-100V 0.1 kW
ホース	形式 寸法 長さ	蒸気用 G1-08 ブレード入り 外形 26.1 mm 内径 12.7 mm 50 m
ホースリール	巻き取り量 ロータリージョイント	50 m NCL-15A
操作盤・接続ケーブル	電源 ケーブル	AC-100V 耐寒ゴムケーブル
マスト・シーブ	マスト シーブ	三脚式 高さ 2 m アルミ製 径 40 cm ナイロン製
自動繰り出し装置	モーター 操作盤	AC-100V 120 W 30-3000 rpm 可変 減速機: 1/200 ドラム速度: 0.15-15 rpm 正逆回転切替 速度コントロールダイヤル
掘削ノズル	掘削スカート 流量制御オリフィス 蒸気噴射ノズル	$\phi=180$ mm, 200 mm 1/2 インチ型 穴径: $\phi=5.5$ mm, 6.0 mm, 6.5 mm 1/2 インチ型
スカート着底信号	形式 発信機 受信機	無線信号式 426 MHz 10 mW 到達距離 100 m 電池: LR4×2 個 チャイム音式 AC-100V
ハンドオーガー	120 ϕ オーガー 35 ϕ 旗立てオーガー 駆動モーター	コア採取型: 1 式 延長ロッド: 1 m×19 本 2 本 マキタ DA4511 改 AC-100V 840W 300RPM

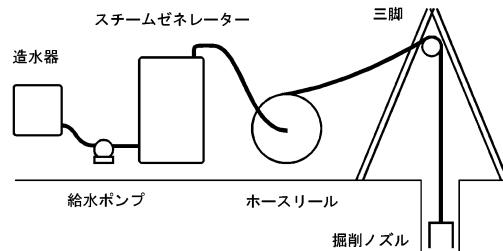


図1 スチームドリルの構成

Fig. 1. Schematic illustration of the steam type drilling system.



図2 専用幌機内に設置されたスチームドリル。左から、造水装置、給水ポンプ、スチームゼネレーター

Fig. 2. Steam type drilling system installed in exclusive sledge. We can see a snow melter, a water pump and a steam generator.

2.2. 掘削作業

探査測線 (HM ルート) と発破地点を図3に示す。2001年12月26日、S16においてスチームドリル用幌機へのスチームドリル機器の取り付け及び機器・装備品の収納・固縛を行った。2002年1月6日から1月25日までSP7からSP1において、それぞれ1日ずつスチームドリルにより発破孔の掘削を行った。ただし、最初のSP7では1月6、7日の2日間掘削を行い、6日は掘削作業慣熟を目的に10.8 mまで掘削した。掘削前日は掘削予定地点に到着後、直ちに震源班全員によりバーナーの取り付け、操作盤の設置、三脚の設置等の掘削準備作業を行った。作業時間は概ね30分であった。なお、給水ポンプについては、凍結による破損を防止するため雪上車内に保管し、掘削作業直前に設置した。

発破孔掘削作業における人員の配置は、隊員2名(石崎と渡邊)が専属で、終日スチームドリルの操作にあたった。また、他の作業に余裕がある場合は、隊員1名(柳澤)が掘削作業をサポートした。作業内容は、造水用雪塊の切り出し、造水器・スチームゼネレーターの操作、自動繰り出し装置の操作、掘削状況監視、検尺、記録などであった。掘削した発破孔が曲がったり分岐していたりすると、装薬時のトラブルや誘爆不良の原因となる。これを避けるために、頻繁にノズルスカートの着底具合を確認し、慎重にホースを繰り出した。ノズルスカートの着底具合の確認には、当初、着底センサーを使用した。これは、ノズルスカートの着底をシール形スイッチで感知し、無線で地上に報せるものである。これにより、かなりスムーズに掘削を進めることができた。スイッチは防浸型、送信機は簡易防水型であり、さらにシリコンで防水加工していたが、SP6の掘削途中で正常に動作しなくなった。掘削終了後

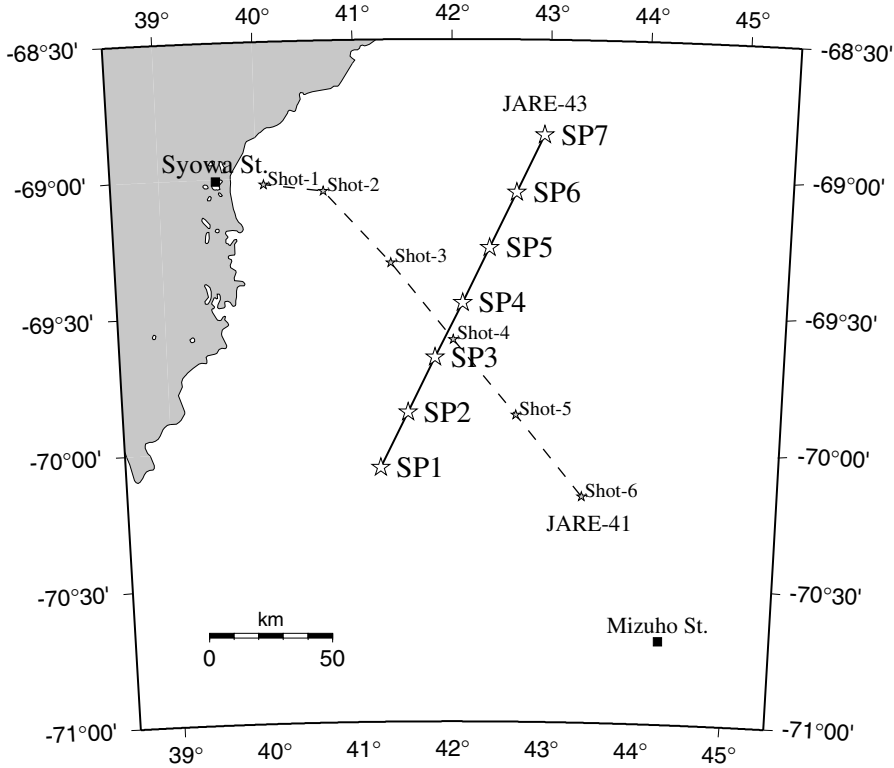


図3 人工地震探査実験の測線図。実線は JARE-43 の測線を、星は発破点を表す。破線は JARE-41 の測線

Fig. 3. A map showing the seismic profile. The solid line and stars indicate the seismic profile in JARE-43 and the shot points, respectively. The broken line indicates the seismic profile in JARE-41.

に原因を調べたところ、発信機が浸水していた。予備機と交換したが、SP4 の掘削途中で、発信機・スイッチともに浸水してしまい、これも正常に動作しなくなった。着底センサーが使用できないときは、ホースを手で引っ張り上げてノズルスカートの着底具合を確認した。

掘削作業当日、造水、スチームゼネレーターの立ち上げ等、掘削開始までの作業時間は 50-70 分を要した。また、掘削終了後は震源班全員により、ホースの巻き上げ、スチームゼネレーター内の温水及び水蒸気の排出、バーナーの取り外し、操作盤の収納、給水ポンプの取り外し、機器の固縛等を行った。作業時間は概ね 1 時間を要した。

スチームドリルの運用にあたり、造水器及びスチームゼネレーター用燃料として、JET-A1 を 7 箇所掘削で合計約 200 l 消費した。

3. 掘削結果

各発破孔の最終掘削孔長等の情報を表 2 に、各発破孔の掘削深度の時間変化を図 4 に示す。

表2 発破孔掘削結果

Table 2. Drilling results of 7 blasting holes.

月/日	地点	総掘削時間 (時)	掘削口径 (cm)	掘削孔長 (m)	平均掘削速度 (m/hr)
1/6,7	SP7 (HM150)	7:15	35	28.70	3.96
1/10	SP6 (HM125)	7:50	40	25.70	3.28
1/13	SP5 (HM100)	7:35	35 - 40	24.35	3.21
1/16	SP4 (HM75)	7:56	35 - 40	23.80	3.00
1/19	SP3 (HM50)	7:05	35 - 40	24.25	3.42
1/22	SP2 (HM25)	8:15	35 - 40	23.60	2.86
1/25	SP1 (HM1)	7:50	35 - 40	24.50	3.13

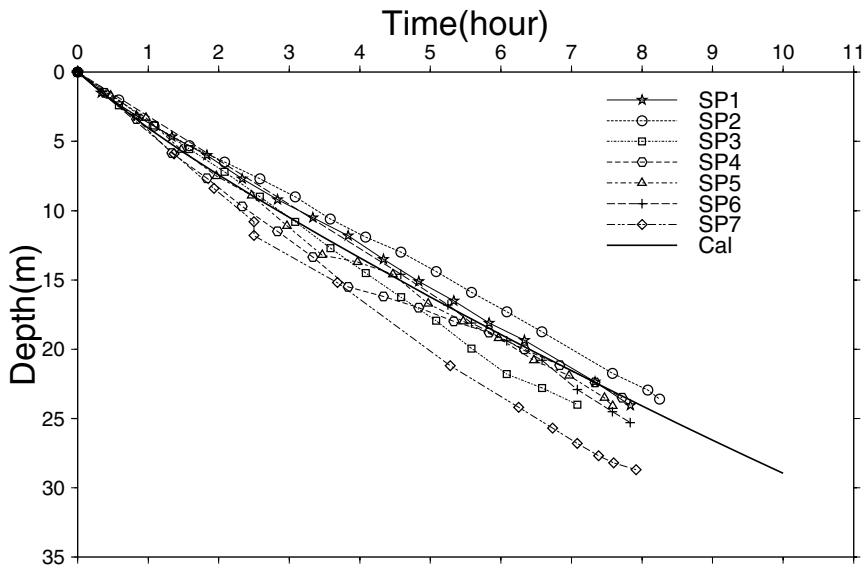


図4 掘削深度の時間変化. 曲線 Cal はみずほ基地での水床表層の密度を仮定した計算値
 Fig. 4. Drilling chart in JARE-43. Bold solid curvature 'Cal' is a theoretical one calculated with the density of the ice sheet surface at Mizuho Station.

SP7 のグラフにステップが見られるのは、1 日目の掘削終了時から 2 日目の掘削開始時までに、孔底に溜まった水の熱によって孔底の雪が溶融し、深くなったものと考えられる。掘削深度の時間変化から、掘削速度はほぼ一定であることが判る。JARE-41 人工地震探査実験では、深さ 15 m を越えるころから掘削速度が遅くなり、20 m 以深では掘削速度が急激に遅くなったことが報告されている (村上ら, 2000)。しかしながら、今回の結果を見ると掘削速度はほぼ一定であり、掘削速度の鈍化は見られない。

また、今回は小型の防水型 CCD カメラとリールに巻いた延長ケーブルを接続し、ボアホールカメラとして使用した (図 5)。映像はビデオカメラに入力して記録した。電源は、サイ



図5 ボアホールカメラ

Fig. 5. Borehole camera system.

クロン電池 (6 V, 16 Ah) を 2 個用いた。この映像は、掘削孔内の壁面状況の確認はもとより、装薬時の孔詰まりやロープの絡まり等の確認にも活躍した。

ボアホールカメラの映像によると、スチームドリルによる掘削孔の内壁は、内視鏡で覗いた消化管のように凹凸が連続していることが観察された。ダイナマイト装薬後、砕いた雪を大量に投入して発破孔を塞いだ(雪封と呼ぶ)。発破後は雪面に長さ数 10 cm のひび割れが発生しただけでその他の地表変形や噴出物は皆無であった。投入してから発破までの 5 時間ほどの間に固結した雪封が凹凸に引っかかり、発破時の噴出物を完全に抑えこんだものと推定される。

4. 掘削深度と氷床表層の密度

スチームドリルは、氷床表層を融かしながら孔を掘り下げていくので、掘削速度が氷床表層の密度と密接な関係があることは容易に想像がつく。そこで、計算上どのように掘削が進んでいくのか、次のようにして掘削深度を試算した。

まず、 4 kg/cm^2 の蒸気がノズルから噴出されて t_s °C の雪を融かし 0°C の水になり、融けた雪も 0°C の水になると仮定する。1 kg の水蒸気が放出する熱量 Q_v および氷 1 kg が融解するのに必要な熱量 Q_s は次のように求められる。

$$Q_v = (t_v - 100) c_{pv} + \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{m} + (100 - 0) c_{pl} \cdot$$

$$Q_s = - (t_s - 0) c_{ps} + \frac{\Delta H_{\text{fus}}}{m} \cdot$$

ここで使われている記号の意味および数値 (理科年表: 国立天文台編, 2000) は次の通りで

ある.

- t_v : 水蒸気の温度 (°C)
- c_{pv} : 水蒸気の定圧比熱容量 (2.051×10^3 J/K/kg)
- ΔH_{vap} : 水の蒸発エンタルピー (4.066×10 J/mol)
- m : 水のモル質量 (1.802×10^3 kg/mol)
- c_{pl} : 水の定圧比熱容量 (4.210×10^3 J/K/kg)
- t_s : 氷の温度 (°C)
- c_{ps} : 氷の定圧比熱容量 (2.033×10^3 J/K/kg)
- ΔH_{fus} : 水の融解エンタルピー (6.01 J/mol)

4 kg/cm² での水の沸点は 144°C であり、探査期間中の深さ 1 m での雪温はほぼ -14°C で一定であった (松島ら, 2003) ので、 $t_v=144$ 、 $t_s=-14$ と仮定すると、 $Q_v=2.77 \times 10^6$ J/kg、 $Q_s=3.62 \times 10^6$ J/kg となる。スチームゼネレーターの造蒸気能力が 40 kg/hr であるから、1 時間あたりに融かすことができる氷の質量 M は 3.06×10^2 kg となる。

また、掘削孔を直径 r の円柱状と仮定し、氷床表層の密度を $\rho(z)$ とすると、短い時間 Δt とその間に掘削される深さ Δz の関係は次のように表せる。

$$\Delta t \cdot MP = \Delta z \cdot \pi r^2 \rho(z),$$

ここで、 P は水蒸気が放出する熱量のうち、氷の融解に使われる割合を表す。さらに、氷床表層の密度が 1 次関数 ($\rho(z)=a+bz$) であるならば、掘削深度 (z) は次のような時間 (t) の関数で表すことができる。

$$z = \sqrt{\frac{2MP}{b\pi r^2} t + \frac{a^2}{b^2}} - \frac{a}{b}.$$

探査測線上での氷床表層の密度分布は得られていないが、みずほ基地で得られた密度分布 (Narita and Maeno, 1978) を仮定する。すなわち、氷床表層の密度を、表面では 380 kg/m³、8 m 深では 550 kg/m³、30 m 深では 730 kg/m³ を通る 2 本の直線と仮定して求めたグラフを図 4 中の曲線 Cal で示す。ここで、 $r=40$ cm、 $P=0.7$ を仮定した。一方、図 6 は、JARE-41 (スチームゼネレーターの造蒸気能力は 25 kg/hr) の掘削深度グラフに $r=35$ cm、 $P=1.0$ を仮定したグラフを加えたものである。Shot-1 の掘削時、深さ 25.4 m のところでノズルスカートが脱落したため、それ以降のグラフは破線で示してある。図 4 の計算値は、JARE-43 の掘削結果と良い一致を見せている。しかし、これは $P=0.7$ を仮定した値であり、慎重に掘削したせい、使われた熱の効率がそれほど高くない。言い換えれば、もっと掘削速度を上げることが可能であったことを意味している。一方、図 6 では、計算値が屈曲することなく延びているのに対し、実際の掘削結果は深さ 15–20 m 付近で屈曲している。これは、15 m 深付近から氷床表層の密度が急に高くなっているためであると考えられる。では、JARE-43 での掘

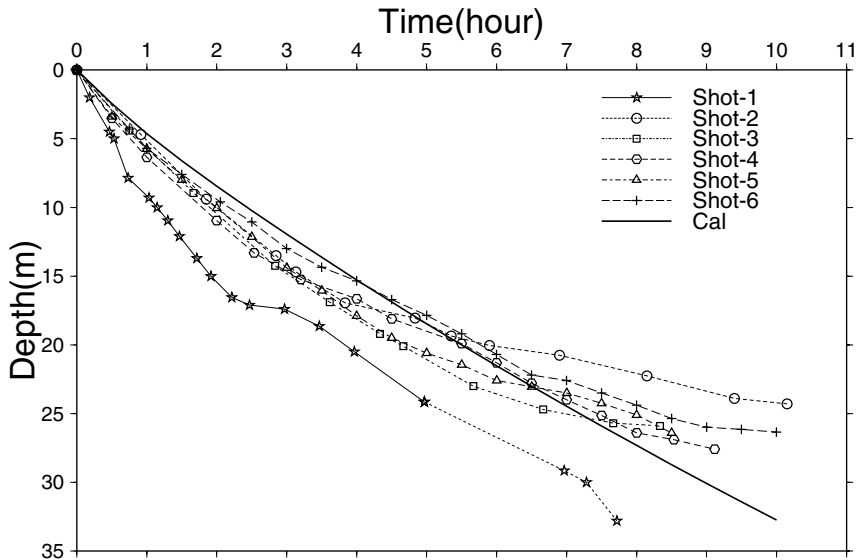


図6 JARE-41での掘削深度の時間変化 (村上ら, 2000)

Fig. 6. Drilling chart in JARE-41 (Murakami et al., 2000) and a theoretical curve as Fig 4.

削結果が屈曲していないのは何故であろうか. 一つの可能性として, 氷床密度の急増が無かったことが考えられる. しかし, JARE-41 では Shot-1 を除くすべてのグラフが屈曲していることから 15 m 深付近での氷床密度の急増は広範囲に亘っていると推測され, また JARE-41 の Shot-4 と JARE-43 の SP3 は 10 数 km しか離れていないので, JARE-43 の掘削地点で氷床密度の急増が無かったとは考え難い. 別の可能性として, スチームドリルの性能に余裕があったために, 氷床密度が急増しても速度を鈍らせることなく掘削できたものと考えられる. 図4の計算値が $P=0.7$ を仮定した値であることから, スチームドリルの性能に余裕があったことが, 15 m 深付近でのグラフの屈曲が現れない原因だと考えられる.

5. ま と め

スチームドリルによる震源発破孔掘削は, 重大なトラブルの発生もなく当初の目的を達成することができた. 1 日で発破孔の掘削作業が完了できるスチームドリルは, 行動日数に制限のある夏期行動においては非常に有用であった.

ボアホールカメラの映像によると, スチームドリルによる掘削孔の内壁は, 内視鏡で覗いた消化管のように凹凸が連続している. ダイナマイト装薬後のタンピングとして雪を使用したことにより, 発破時の地表への噴出物を完全に抑えることができた. その結果として, 発破のエネルギーが効率良く地震波に変換され, 良好な観測記録を得ることができた. また, 噴出物が皆無であることは環境に与える影響を最小に抑えることにも大いに貢献した.

氷床表層の密度から、理論的に掘削深度曲線を求めることを試みた。実際の掘削深度曲線と比較した結果、深さ 15 m 付近から氷床表層の密度が高くなっているが、造蒸気能力が高ければ掘削速度に影響はないといえる。

謝 辞

今回の人工地震探査実験にかかるスチームドリルによる発破孔の掘削のため、各方面から多くのご支援を頂きました。国内での開発・準備においては、金尾政紀博士・渋谷和雄教授・神沼克伊名誉教授(国立極地研究所)、高橋昭好氏(地球工学研究所)をはじめ、多くの方々のご支援を頂きました。特に村上寛史氏(防災科学技術研究所)には JARE-41 の経験に基づいて技術的な助言を頂くと共に、掘削記録を提供して頂きました。さらに現地においては JARE-43 (西尾文彦隊長・神山孝吉越冬隊長) および JARE-42 (本吉洋一越冬隊長) 隊員各氏にご支援頂きました。ここに記してお礼申し上げます。最後に、7 週間におよび雪上車生活を共にした高橋康博氏(北海道日本油脂)と中野浩司氏(大原鉄工所)に心より感謝します。

文 献

- 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.
- 金尾政紀 (2001): 東南極盾状地からみた大陸進化形成史—「SEAL 計画」におけるジオトランセクトの概要と意義—. 東京大学地震研究所彙報, **76**, 3-12.
- 金尾政紀・東 敏博 (1999): 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). 南極資料, **43**, 375-405.
- 国立天文台編 (2000): 理科年表. 丸善.
- 松島 健・山下幹也・安原達二・堀口 浩・宮町宏樹・戸田 茂・高田真秀・渡邊篤志・渋谷和雄 (2003): 南極ペネトレータの開発と試験観測—第 43 次夏期観測における実験—. 南極資料, **47** (投稿中).
- 宮町宏樹・村上寛史・筒井智樹・戸田 茂・民田利明・柳澤盛雄 (2001): 東南極みずほ高原における屈折法地震探査実験—41 次夏期観測概要—. 南極資料, **45**, 101-147.
- 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・柳澤盛雄 (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 次夏期報告)—. 南極資料, **47**, 32-71.
- 村上寛史・下田泰義・宮町宏樹・民田利明・金尾政紀・柳澤盛雄・神沼克伊・高橋昭好 (2000): 人工地震探査用ボーリング装置の開発と JARE-41 実施結果. 第 20 回南極地学シンポジウム講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 29.
- Narita, H. and Maeno, N. (1978): Compiled density data from cores drilled at Mizuho Station. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **10**, 136-158.

(2003 年 1 月 14 日受付; 2003 年 2 月 4 日改訂稿受理)