

南極・昭和基地の岩盤ボーリング

神 沼 克 伊*

Core Drilling at Syowa Station, Antarctica

Katsutada KAMINUMA*

Abstract: The first core drilling at Syowa Station in Antarctica was carried out by the 21st Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-21) by a rotary core drilling method using air as the drilling fluid. After 26 days of drilling work, a 20 m-deep borehole was obtained in March 1980. In order to deepen this borehole, the core drilling was succeeded by JARE-22 using water as the drilling fluid. However, drilling rods were stuck in the hole during the removal of the frozen drilling fluid. The part of the hole which is deeper than 5 m could not be used for underground temperature measurements. Though a new 30 m-deep hole was drilled in March 1981, drilling rods were stuck in the hole again. Only the upper part of the hole which is shallower than 7 m could be used for the temperature measurements.

Another 30 m-deep hole was drilled in January 1982. It was done well to make the 30 m-deep hole. However, the hole could not be used for the temperature measurements, because drilling rods were stuck in the hole again during the removal of the drilling fluid. Though the leakage and/or flood of water in the drilling hole on East Ongul Island was beyond prediction, a few cracks at the depth from the surface to 10 m were found to act as waterways. To keep water from leakage and/or flood is the most important in the core drilling at Syowa Station.

要旨: 日本南極地域観測隊は、第20-22次の「昭和基地を中心とする地域の地殻構造の総合解析」研究の一環として、地温測定と地盤傾斜観測のために岩盤ボーリングを行った。第21次隊よりエアボーリングが開始され、深さ 20 m の孔を得て地温測定が行われた。作業能率その他を考慮して第22次隊では水ボーリングを採用し、深さ 30 m を目標とするボーリングを行った。しかし、凍結のため孔内にロッドが抑留され地温測定用としては 7 m 以深は使用できなくなった。さらに 30 m ボーリングを試み、2 960 cm 孔の掘削に成功した。しかし、孔内に残った掘削流体が凍結し、これを掘削中、またもロッドが抑留され、結局、この孔は使用できなかった。

凍結は、予想以上の大量の逸水のため不凍液濃度を十分に保つことができず発生した。逸水または出水を防ぐことが、今後昭和基地で岩盤ボーリングを再開する際もっとも重要な点である。

1. はじめに

雪と氷、低温、強風など自然環境の厳しい南極で岩盤ボーリングを行うことには多くの困難を伴う。これまで南極で岩盤ボーリングが実施されたのは、日本、ニュージーランド、ア

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

アメリカの3国による国際共同観測として、1973-1976年に行われたドライバレー掘削計画(DVDP)だけである。DVDPでは掘削技術者が24時間態勢で作業を実施し、掘削流体に軽油を用いて最深381mの孔を得ている。回収された岩石コアから地質、岩石学的研究がなされているほか、孔を利用した地温測定等も行われた(たとえば McGINNIS, 1974, および TREVES, 1974)。

日本南極地域観測隊は第20-22次の3カ年計画「昭和基地を中心とする地域の地殻構造の総合解析」において人工地震、重力測定等の各種観測を行った。そして同計画の一環として地殻熱流量測定のためのボーリング(目標深度30-50m)と、埋設型傾斜計設置のためのボーリング(同2-3m)が行われた。

昭和基地において掘削流体に石油または水を大量に使うことは、環境汚染の心配とオペレーション上の困難が予想されたため、21次隊ではエアボーリング方式を採用した。しかし3章の考察で述べるように、岩盤の硬さと予期せぬ出水のため、22次隊では掘削流体に不凍液を用いる(以下、水ボーリングと呼ぶ)方式を採用した。以下2章では用いた機器の概要と、両方式の比較を行い、3章でボーリング作業中直面した困難および問題点を考察する。4章のまとめとあわせ、今後の極域での岩盤ボーリングへの参考となることを期待したい。

2. 岩盤ボーリング

2.1. 概要

当初、地殻熱流量測定のための岩盤ボーリングは22次隊で実施される計画であったが、その緊急性が指摘され、埋設型傾斜計設置のためのボーリングとともに21次隊から実施された。オペレーション上、ボーリングサイトは昭和基地近くで、ボーリング作業は夏期間に集中的に実施する必要がある。極域の岩盤下での熱プロセスがほとんど知られていない現在、東オングル島のように、急峻なオングル海峡という海水の熱的な壁を持つ地域で意味のある観測を行うには、孔を恒久的に保持し、長期間垂直温度プロファイルを監視する必要がある。

孔の目標深度は最初のボーリングということもあり、気温の季節変化の影響、温度センサーの分解能等も考慮して50mを設定した。孔の径は温度センサー容器の径38mm以上必要だが、クリアランスを考慮し標準的な46mm径を設定した。

図1にボーリングサイトを示す。1, 2, 3の×印は各々、埋設型傾斜計のための孔の位置、エアボーリングおよび水ボーリングによる地殻熱流量測定のためのボーリングサイトを示している。埋設型傾斜計用と地殻熱流量測定用では、口径と目標深度に相違はあるものの、掘削それ自体には差異が少ない。したがって以下では地殻熱流量測定用のボーリングを中心に議論する。

第21次隊、22次隊ともに予算および隊員編成上の制約からボーリング専任の隊員と極地仕様のボーリング機械は得られなかった。したがってボーリング技術の点からは観測隊全般の

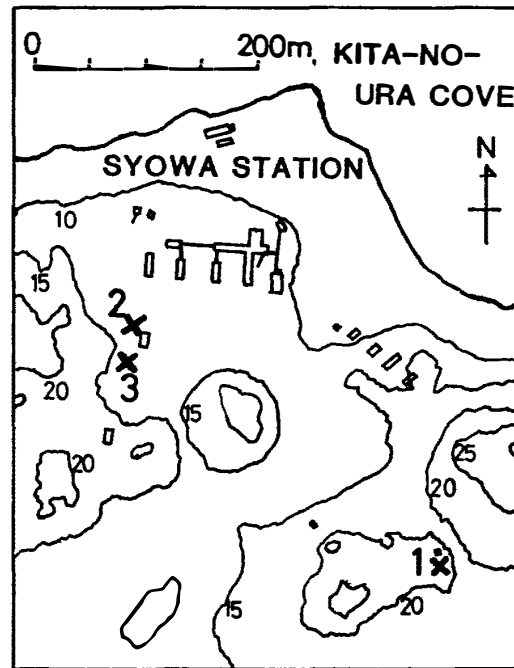


図 1 ポーリングサイトの位置

Fig. 1. Locations of the core drilling sites.

極域での岩盤ボーリング経験の蓄積と継承，および市販の一般土木用ボーリング機械がいかに適用できるかが課題となった。21次隊のエアボーリングの準備および現地での作業は加藤隆一（設営一般），片岡信一（人工地震）が行い，22次隊の水ボーリング作業は長尾年恭（地学）および神沼克伊（地学）が行ったほか，佐々木清隆（地学），森脇喜一（地学），酒井量基（地球物理定常）の助力を得た。実際の作業においては調達機材の部品加工，工具等の工夫が要求され，作業継続は担当隊員の臨機応変性と創意工夫によるところが大きい。なおエアボーリング，水ボーリングとも機械担当隊員の協力を得た。

2.2. 使用機材

掘削関係の用具はすべて鉦研試錐株式会社製を使用した。表 1 に21次，22次隊で調達および使用した物品の一覧表を示す。図 2 はボーリングシステム全体の模式図を表している。以下主要用具に若干の説明を加える。

1) ボーリング機械

ボーリング機械は KT-2 オイルフィールド式ボーリング機械（公称掘削深度 50 m）が使用され，動力としては 5 馬力ガソリンエンジンが使用された。

2) ビ ッ ト

メタルクラウンビット（以下メタルと略す），サーフェスセットダイヤモンドビット（同ボルツ），インプリグネーティドダイヤモンドビット（同インプリ）の 3 種のビットが使用された。エアボーリングでは，この方式に一番実績を持つボルツとメタルを併用し，水ボーリングでは破損し

表 1 機材一覧
Table 1. List of tools.

Tool		JARE-21	JARE-22
Drilling machine		KT-2	KT-2
Metal crown bit	(46 mm)	24 pcs	15 pcs
Surface set diamond bit	(46 mm)	2 pcs	1 pc
Impregnated diamond bit	(46 mm)	—	6 pcs
Metal crown bit	(144 mm)	5 pcs	5 pcs
Surface set diamond bit	(144 mm)	1 pc	—
Impregnated diamond bit	(144 mm)	—	1 pc
Derrick	(6 m)	1 set	1 set
Air compressor		TR-160	TR-160
Water pump		—	MG-5A
Water swivel		1 pc	1 pc
Core tube	(46 mm)	50 cm×10 pcs 30 cm×10 pcs	50 cm×10 pcs 100 cm×3 pcs 150 cm×2 pcs
Core tube	(144 mm)	50 cm×2 pcs 30 cm×3 pcs	50 cm×2 pcs
Drilling rod	(40.5 mm)	1.5 m×20 pcs 3.0 m×10 pcs	1.5 m×40 pcs
Core lifter	(46 mm)	10 pcs	12 pcs
Core lifter	(144 mm)	2 pcs	2 pcs

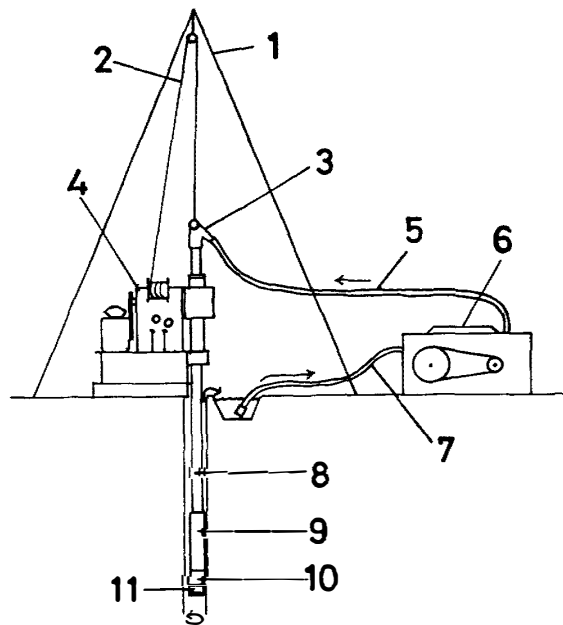


図 2 ボーリング模式図. 1. やぐら, 2. ワイヤ, 3. ウォータースイベル, 4. ボーリング機械, 5. 送水ホース, 6. 送水ポンプ, 7. 吸水ホース, 8. ボーリングロッド, 9. シングルコアチューブ, 10. コアリフター, 11. ビット.

Fig. 2. Schematic view of core drilling system. 1. Derrick, 2. Wire, 3. Water swivel, 4. Drilling machine, 5. Delivery hose, 6. Piston pump, 7. Suction hose, 8. Drilling rod, 9. Single core tube, 10. Core lifter, 11. Drilling bit.

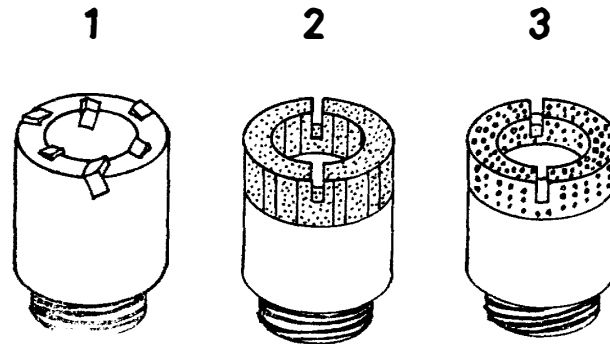


図 3 使用したビットの模式図. 1. メタルクラウンビット, 2. インプリグネーティッドダイヤモンドビット, 3. サーフェセットダイヤモンドビット.

Fig. 3. Schematic view of three types of drilling bits. 1. Metal crown bit, 2. Impregnated diamond bit, 3. Surface set diamond bit.

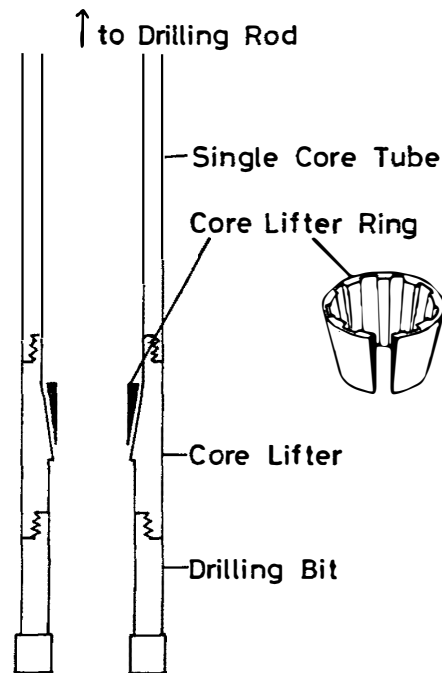


図 4 コア回収用具模式図

Fig. 4. Schematic view of core recovery tools.

ても現地での加工が可能ということから、インプリが主に用いられた。図3に上記各ビットの模式図を示す。

3) コアリフター

コアの回収は、図4に表したコアリフターとコアリフターリングを使用し、シングルコアチューブ方式で行われた。

4) エアコンプレッサー

エアボーリングにおいては、8次隊持ち込みの土木工事用エアーマン（最大流量 5 m³/min

最大圧力 7 kg/cm^2) が用いられた。

5) 水循環ポンプ

水ボーリングにおいては、MG-5A 型ピストンポンプ (吐出量 70 l/min , 吐出圧力 25 kg/cm^2) が22次隊により持ち込まれ使用された。凍結の危険があるので 30% 不凍液が循環水として用いられた。

2.3. ボーリング作業

表2はサイト別のボーリング作業の実施期間、実働日数、到達深度のまとめである。地殻熱流量測定用ボーリングそのものは、エアボーリングで 2015 cm 、水ボーリングで 2960 cm を達成したが、ロッドの抑留事故により1981年1月以降は孔の 7 m 以浅のみが利用されている。埋設型傾斜計用ボーリングは1981年1月目標深度を達成し傾斜観測を開始した。

表2 昭和基地における岩盤ボーリング
Table 2. Core drilling at Syowa Station.

	Period (working days)	By	Depth
For temperature measurements	Jan. 27–Mar. 22, 1980 (26 days)	JARE-21	2015 cm
	Feb. 10–Mar. 8, 1981 (7 days)	JARE-22	1370 cm
	Jan. 5–Jan. 18, 1982 (7 days)	JARE-22	2960 cm
For the borehole tiltmeter	Mar. 25–Apr. 4, 1980 (5 days)	JARE-21	0–95 cm
	Jan. 24–Jan. 28, 1981 (3 days)	JARE-22	95–187 cm

2.3.1. エアボーリング

図1の2のサイトにコンクリートの基礎を打ち、角材を組んでその上にボーリング機械を固定した。架台の水平出しにより孔まがりと回転むらが規定されるので注意を要した。口切りはメタルビットで行った。メタル使用時は、ボーリング機械の回転数は 150 rpm とし、給圧は 4 kg/cm^2 から徐々に上げて最終的には 30 kg/cm^2 まで使用した。ボルトの場合は 600 rpm としたが、掘削深度が進むにつれてロッドに振動が発生し、 600 rpm を保てなくなった。ボルトの場合、給圧は最大で 20 kg/cm^2 とした。 1400 cm 深度で調達ビットはすべて消費してしまったが、メタル全24個のうち再生可能な15個を研磨して再利用した。最終的に実働26日間 (52人日) の後、 2015 cm 孔 (以下 20 m 孔と示す) を得ることができた。得られたコアは 1552 cm でコア回収率は 77.0% であった。

2.3.2. 水ボーリング

21次隊夏期間に得られた 2015 cm 孔をさらに掘り進めるために、設置してあった温度センサーを回収した。水ボーリングで掘削を開始したが、水がまったく循環せず垂れ流し状態となり、ロッドが凍結し、孔内に抑留された。このため図1の3で新たに掘削を開始した。ボーリング機械の架台の設置条件はエアボーリングと同一であるが、掘削深度が進んでもロ

ッドの振動は発生せず、常に 600 rpm を保つことができた。しかし、逸水が予想外に激しく、不凍液の濃度を保つことができなかったため、考察の項で述べるコアリフターの故障対策をしている間に、1 370 cm 掘削したところでロッドが凍結した。ロッドの回収は 7 m 成功しただけであった（以下 13 m 孔と示す）。3 度目のボーリングは、22 次隊越冬あけの 1982 年 1 月に 13 m 孔の約 1 m 南側で実施した。13 m 孔と同じく逸水は深さ 2 m を過ぎたあたりから始まり、5 m 付近からさらに激しくなった。この逸水は、水の中に粘性の大きいトルクコンバーター用オイルを混入することにより一時的にはかなり防げたが、逸水を止めるまでには至らなかった。そして 2 960 cm 掘削した時点で給水車が故障したこともあり、また一応最低限の目標深度を達成したことからボーリング作業を終了した。2 711 cm のコアが回収され、回収率は 91.6% であった。

2.3.3. 埋設型傾斜計用ボーリング

サイトは図 1 の 1 である。エアボーリングでは、表 2 に見られるように 1980 年 3 月-4 月に 95 cm 掘削したが、コアリフターリングの変形のためコアが回収できず作業の中止を余儀なくされた。1981 年 1 月よりふたたび水ボーリングで作業を開始し、この孔を 187 cm まで掘り下げた。この孔を用いた埋設型傾斜計は現在順調に作動中である。

3. 考 察

3.1. ボーリングの作業能率について

エアボーリングでは実働 26 日間 (52 人日) の後 2 015 cm の孔 1 本、水ボーリングでは実働

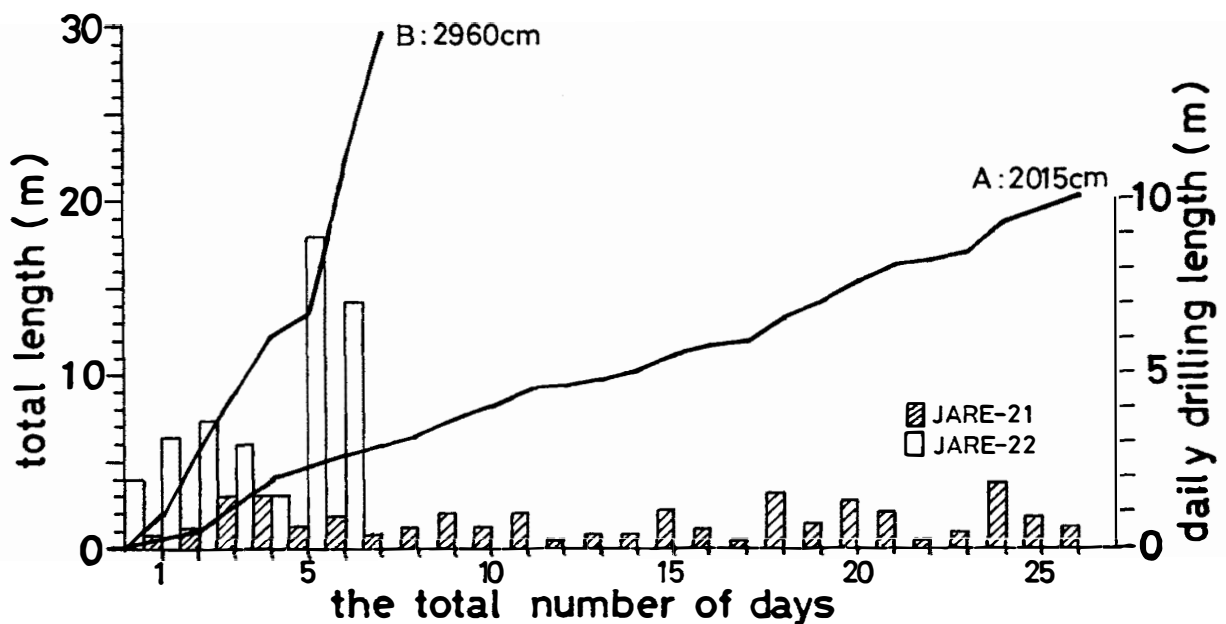


図 5 20 m 孔, 30 m 孔の日別掘削表
Fig. 5. Daily operation of the drilling.

7日間(16人日)で2960cmの孔1本が得られた。図5は両者のボーリング作業の日別進行表を示す。ビットの総使用量は、エアボーリングの場合メタル39個、ボルト2個、水ボーリングの場合はメタル6個、インプリ4個であった。水ボーリングの場合ロッドの振動がみられず、600rpmの回転が維持できたことから、エアボーリングの場合のロッドの振動は、孔壁とのまさつが主原因だろうと思われる。結局、掘進率という点からは、水ボーリングの方がエアボーリングに比べ3-5倍の作業能率を持つと思われる。

3.2. 出水・逸水について

当初、昭和基地の岩盤下に地下水は無いと予想された。しかしエアボーリングの場合、模式的に図6の1に示すクラックから孔への出水があったと思われる。エアボーリングでは、出水は切り屑の排出にとって最大の障害となる。出水と逸水は表裏の関係にあり、水ボーリングサイトでは、図6の2に示す10mより浅いクラック2-3カ所から逸水したと考えられる。エアボーリングにおいて出水が見られたことから、水ボーリングを行うときも逆にある程度の逸水が考えられたが、完全に垂れ流しになるほどの大量の逸水が生じるとは予想しなかった。

30m孔では用意した不凍液原液500l、トルクコンバーター用オイル400lをすべて消費して、最終日には給水車で14tの水を補給したがすべて逸水する有様であった。逸水防止剤の使用は、22次隊出発の時点では-10℃という低温下での使用実績がほとんどないことと、粘性の異常な増大による事故の可能性が強いのではないかと判断され、準備されなかった。

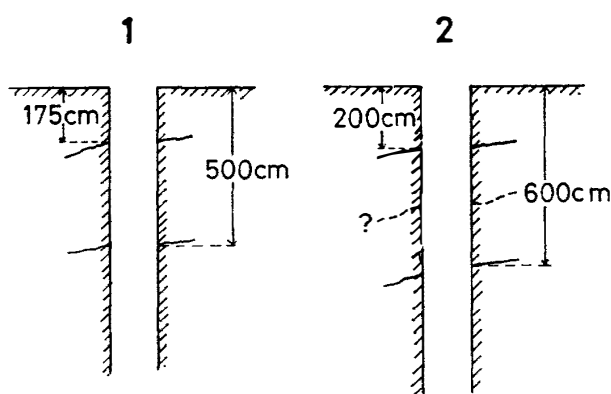


図6 20m孔, 30m孔におけるクラックの推定位置
Fig. 6. Estimated crack locations in the 20 m-deep and 30 m-deep holes.
1. 20 m-deep hole. 2. 30 m-deep hole.

3.3. ロッド抑留事故について

ロッド抑留事故は本質的には逸水と関係している。水ボーリングでは凍結を防ぐため不凍液原液500l(ドラム缶2.5本)を使用した。しかし逸水が激しい時は不凍液を作る余裕がなく、水のみを補給してボーリングを継続せざるを得なかった。そのため循環液の濃度が低下している時に、循環状態が悪くなり、凍結を引き起こしたと思われる。20m孔, 13m孔で

の抑留事故はいずれもこのような時に発生している。ロッドの継ぎたし，取りはずしの 1-2 分間に抑留は発生している。不凍液濃度が低下し，水に近い状態では数分間のロッドの回転停止も行えないことを示している。30 m 孔では，温度センサー挿入のためエアボーリングにて孔内の氷の除去を行ったが，深さ 26 m の地点でエアが循環しなくなり，やはりロッドが抑留された。これは 26 m 以深では結果的にエアコンプレッサーの能力不足を生じ，氷の切り屑が完全に排出されず孔壁とロッドの間にたまり，ビット部分では氷がコアづまりを起こしたためと推定される。

4. おわりに

13 m 孔が不成功に終わった 1 つの原因は，インプリの内径とコアリフターの内径が合わないものが用意されたことである。このため，現地でコアリフターを改造し，結果的には強度の低下をまねいた。

3 章の考察から，昭和基地での岩盤ボーリングには今後以下の点を考慮する必要がある。掘削流体に液体を使用する場合の最大の問題点は凍結と逸水である。昭和基地周辺の岩盤は大部分花崗岩質片麻岩で，岩質は硬く孔壁がくずれる心配はほとんどない。また，13 m 孔，30 m 孔とも水ボーリングにおいて孔口から 6 m 下には常に水があったこと，SHIBUYA *et al.* (1982) の報告では地下 10 m の地温は年間を通じて常にマイナスであることなどから，逸水はそのほとんどが 10 m より浅い所で起きていると推定される。したがって逸水を防止するための第 1 の策は，10 m 深度までケーシングパイプを使用することである。ケーシングの肉厚を考慮すると，地殻熱流量測定用の孔の場合，口径を 46 mm から 54 mm へ上げる必要があるが，機械のシステムへの根本的な影響はないと思われる。第 2 の策は，セメンテーションまたは逸水防止剤を孔内へ流し込みクラックを埋める方法であるが，この時 -10°C でも使用可能な物質でなければならない。逸水が防止できれば孔内の凍結も防げるであろう。

逸水または出水防止後のシステム全体の検討としては，ワイヤーライン工法が上げられる。ワイヤーライン工法では，コアだけをロッド内部を通るワイヤーとインナーチューブで回収できるので，ロッドの昇降は原則としてビット交換時だけとなり，孔が深くなるほどシングルコアチューブ方式より作業能率が向上すると期待される。表 2 の 30 m 孔の作業能率から類推し，単純計算を用いると 100 m 孔を水ボーリングする場合，準備時間を考慮したファクターを 2 として約 300 時間必要である。オペレーション上，夏期に集中的なボーリング作業を実施する必要性を考えると機械，ポンプ，エアコンプレッサーともに目標深度の 2-5 倍の能力を持つ機材を準備することが，事故の減少，作業能率の点からも得策と思われる。

謝 辞

ボーリング作業中、様々な配慮と激励を下された川口貞男第21次越冬隊長および吉田栄夫第22次越冬隊長に感謝する。また、ボーリング作業に従事した 2. 1. に掲げる隊員のみならず、その他様々の形で助力して下さったすべての第21次、第22次越冬隊員の援助なしには作業は継続し得なかった。合わせてここに謝意を表す。この報告は21次隊については加藤、片岡両隊員の報告をもとに渋谷隊員がまとめたもの、22次隊は長尾隊員のまとめたものをもとに、筆者が整理した。

文 献

- McGINNIS, L. D. (1974): Dry Valley Drilling Project summaries 1973-74. DVDP Bull., 3, 1-6.
SHIBUYA, K., NAGAO, T. and KAMINUMA, K. (1982): Measurements of underground and under-water temperatures by quartz thermometers at Syowa Station, East Antarctica. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), 76, 89-100.
TREVES, S. B. (1974): Summary of drilling activities September-December 1973. DVDP Bull., 3, 7-8.

(1982年7月31日受理, 1982年9月21日改訂稿受理)