

氷床深層ドリルの開発

藤井理行¹・本山秀明¹・成田英器²・新堀邦夫³・東 信彦³
田中洋一⁴・宮原盛厚⁵・高橋昭好⁵・渡辺興亜¹

Development of the JARE Deep Ice Coring System

Yoshiyuki FUJII¹, Hideaki MOTOYAMA¹, Hideki NARITA², Kunio SHINBORI²,
Nobuhiko AZUMA³, Yoiti TANAKA⁴, Moriatsu MIYAHARA⁵,
Akiyoshi TAKAHASHI⁵ and Okitsugu WATANABE¹

Abstract: A deep ice coring system, which is to be used a top the Queen Maud Land ice sheet in 1994–1995 with a plan named “Dome Project”, has been developed since 1988. A mechanical system was adopted because of its less power consumption and smaller size compared with a thermal system. Experiments were done for mechanisms of ice cutting, chip transportation, chip storage, antitorque, monitoring sensors, and winch control with a 20-m drill experiment tower. Experiments were also done in Antarctica. This is an interim report of the development of the JARE deep ice coring system.

要旨: 南極氷床のドーム頂上での深層コア掘削計画（ドーム計画）の準備の一環として、1988年から掘削装置の開発を進めている。本報告は、2年間の基礎開発段階における研究と実験の結果をまとめたもので、今後の実用機開発段階を前にした深層掘削機開発の中間報告である。

掘削方式としては、消費電力が少なく、装置の規模が小さいエレクトロメカニカル方式を採用することとし、効率の良いドリルをめざし、切削チップの輸送・処理・回収機構、切削機構、アンチトルク機構、センサー信号処理と掘削制御機構など各部の検討、実験を進めた。特に、液封型のメカニカルドリルの最も重要な切削チップの処理機構では、A型からE型までの方式を比較実験し、A型とC型が優れた方式であることが分かった。国内および南極での実験を通じ、ドリル主要機構の諸課題が解決され、実用機開発にめどが立った。

1. はじめに

南極氷床の内陸部では1年を通じて融雪がないため、気候や環境の指標となる積雪の化学

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

² 北海道大学低温科学研究所。Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

³ 北海道大学工学部。Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

⁴ (株) ジオシステムズ。Geosystems Inc., Koraku Bldg. 401, 22–3, Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

⁵ (株) 地球工学研究所。Geo Tecs Co. Ltd., Shirakabe 4–29, Higashi-ku, Nagoya 464.

の性質の保存がよい。さらに、氷床のドーム頂上付近では、年間の積雪量が 5 g/cm^2 以下と少なく、氷の厚さが 2000 m を越えるので、氷は過去 10 万年以上にわたる気候や環境を連続して克明に記録している。現在、地球規模の環境変化が人間生活の将来に及ぼすであろう影響が懸念されており、この環境変化の将来予測のため、南極氷床の深層掘削コアにより過去の気候や環境の変化を研究する計画を、日本雪氷学会 (1988) が提案した他、ヨーロッパ科学財団 (European Science Foundation) や、フランス、アメリカでも計画が検討されている。そして、測地学審議会が日本が今後推進すべき地球科学的課題として、1989年3月「地球科学の推進について—地球科学の現状と将来—」を建議したが、その中で南極氷床の深層掘削をとりあげている。

国立極地研究所は、このため日本雪氷学会の提案になる「東南極氷床のドーム頂上における深層コア掘削計画 (ドーム計画)」を、南極観測第IV期五カ年計画 (1992-1996) の一つとして検討するため、気水圏専門委員会の中に「ボーリングに関する作業委員会」を1988年2月に設置した。この作業委員会は、ドーム計画の多岐にわたる課題を検討するため、いくつかの小委員会を設けた。氷床深層掘削の開発については、1987年の夏以降、雪氷グループで検討してきたが、1988年2月以降この小委員会の一つとして正式に活動を開始し、これまで20回の会合を開き開発をすすめてきた。氷床深層掘削装置はまだ開発の途上にあるが、システムの基礎開発の段階を終えたので、ここではこれまでの経過とともに今後の課題をまとめた。

2. ドリル開発の基本的考え方

氷床深層掘削を行うクイーンモードランド氷床のドーム状の頂部は、1) 昭和基地から 1000 km の遠距離にある、2) 越冬基地としては、最も寒冷な気候である、3) 標高 3800 m の高所にあるなど、地理的にも気候的にも条件が厳しい。このためここで使用されるドリルは、耐寒性に優れているとともに、限定された物資輸送量を考慮するとエネルギー消費が小さいことが性能として要求される。また、南極観測の第IV期5カ年計画の一環として、ここでの掘削に充てられる期間は2越冬期間で、各期間8名の越冬隊員が枠として想定されているが、このことも開発するドリルの性能を基本的に規定することである。

掘削深度は、最終氷期を完全に包含すると予想される 2500 m 深を目標として設定された。この深度は、数 100 m 深までの通常の掘削方法では掘削孔の収縮速度が大きくなるため、掘削孔に氷と同等の密度を持つ液体を入れて掘削する液封式掘削を採用する必要がある。液封式の掘削は日本では未経験の領域で、開発すべき課題が多い。

こうした条件と目標のもとで使用される掘削装置は、次の基本条件を満足するものでなければならない。

1) 液封式コア掘削システム。

- 2) 耐寒性 (-60°C) を有すること.
- 3) 耐液圧性 (300 気圧) を有すること.
- 4) 16 kVA 発電機で駆動できるエネルギー消費の少ないシステム.
- 5) 可能な範囲で分解した時の器材の最大重量は 1.5 t.
- 6) 4 名以下の人数で掘削操作が可能なほど合理化されたシステムであること.
- 7) 掘削許容時間は, 3000 時間.

3. 開発の経過

深層掘削ドリルの開発にあたっては, 国立極地研究所の関連予算の年次執行計画や南極観測将来計画の立案経過などを勘案しながら, 表 1 のような年次計画を設定した. この中で, 1988 年度からの 3 カ年を開発期間とし, その後北極圏またはその他の地域での数 100 m の掘削総合実験を計画している.

3 カ年の開発期間では, 年度ごとに 3 つの段階に区切りそれぞれを次のように位置づけた.

第 1 段階 (1988 年度): 概念設計, 実験環境の整備, 基礎実験

第 2 段階 (1989 年度): 基礎実験, 応用実験

第 3 段階 (1990 年度): 実用機への応用

1) 第 1 段階 (1988 年度)

開発グループは後述 (4 章) するような検討により, 掘削システムとしてメカニカルドリルを選択し, 関連文献の研究, 講師による切削理論等の講義などを通じ, メカニカル液封深層掘削の問題点を表 2 のように整理した. また, 開発期間を通じて利用する実験場の建設および実験装置として, 図 1 に示すような掘削実験塔を設置した. 掘削実験塔は高さ 20 m で, 下部には切削実験用にアクリルの観察用窓の付いた氷収納室があり, 冷却された液が循環するような構造になっている. また, ドリルを昇降し, 駆動するための実験用のウインチと制御盤も設置した.

液封掘削の最も重要な機構であるチップ処理について検討し, 第 1 段階としては A, B (各方式の特徴については 5.1 章参照) 2 方式のプロトタイプを製作した. またアンチトルク装置についても, リーフスプリング方式とスケート方式による装置を試作した. また, ドリルに組み込む小型直流モーター (450 W), ドリルコンピューター, 減速機などについても試作した. こうした部分を組み合わせたプロトタイプのドリルを 2 組製作し, 国内および第 30 次観測隊による南極テストを実施し, 問題点を明確にした. また, 効率の良い切削システムを確立するため, 低温実験室で表層ドリルを用いてメカニカルドリルの切削実験を行った. その結果, 刃のすくい角, 切削速度, 動力等, 氷の切削に関して有意義なデータが得られ, 深層掘削機設計上の参考となった. なお, この結果については藤井ら (1988) の報告がある.

表 1 掘削装置開発年次計画

Table 1. Time schedule for development of the JARE deep ice coring system.

年	JARE	国内	南極/北極
1988	JARE-29	作業委員会の発足 掘削実験塔の設置 ドリルプロトタイプ A, B 型の作製	
1989	JARE-30	バレル基本機構のテスト	南極テスト (第 1 回)
1990	JARE-31	アンチトルク機構のテスト ドリルプロトタイプ C, D, E 型の作製	南極テスト (第 2 回)
1991	JARE-32	耐圧試験装置の作製 バレル基本機構の決定	ドリル掘削実験(北極圏またはその他の地域)
1992	JARE-33	実寸型ドリルの作製 実寸型ドリルの掘削実験	総合掘削実験(北極圏またはその他の地域)
1993	JARE-34	深層掘削用ウインチ製作	ウインチ輸送, 設置
1994	JARE-35	深層掘削用ドリルなど製作	ドリル輸送
1995	JARE-36		2500 m 深層掘削開始 (1 年目) コア輸送 (2 年目) コア輸送 完遂

2) 第 2 段階 (1989 年度)

第 1 段階で提起された問題および第 1 段階より一歩進んだ次の課題を設定し、これらに対応できる技術の確立を目標とした。

チップ処理機構として、新たに C, D, E の 3 方式 (5.1 章参照) を検討しプロトタイプによる実験を行った。チップ輸送ポンプとしてうずまき型軸流ポンプを開発した結果、液封ドリルで最も重要な機構であるチップ輸送の問題を解決した。また、600 W のドリルモーターを開発することにより、これまで以上に力強い掘削が可能となった。刃の高さ調節機構(ヒール)の改良により非常に安定した掘削が可能となり、切削機構については、高圧、低温での切削を除いて、ほとんどの問題を解決した。すくい角、回転数等の理想値も見当がついた。

また、アンチトルクの実験から、リーフスプリング方式の優位性を確認するとともに、い

表 2 深層メカニカル・ドリルの問題点と開発項目
 Table 2. Subjects and items for development of a deep electromechanical drill.

機 構	問 題 点	開 発・検 討 項 目
切 削 機 構	最適切削システム	刃先荷重の制御, 荷重センサー, 信号の高速送信, ウインチの微速自動繰り出し, 刃の向かい角・すくい角
	高圧切削刃 切削刃の低温ぜい性	刃の材質, 形状 刃の材質, 形状
コ ア 収 納	安定な切断方式	コアキャッチャーの形状, ほかの方式
	収納状況の検出	有無の検出法, 長さの検出法
チ ッ プ 処 理	最適輸送システム	チップ輸送ポンプ, チップ輸送パイプバレル, チップ輸送スパイラルバレル
	チップ貯蔵	分離ネット, 貯蔵室寸法, 貯蔵室の開閉法, チップ除去法
	浮遊チップの除去	チップ回収装置
アンチトルク	最適アンチトルク	リーフスプリング方式, スケート方式
ド リ ル 駆 動	小型高性能モーター	直流小型高出力モーター
	耐圧駆動部	軸封技術, 耐圧区画, 耐圧試験機
	電力供給	ケーブル送電法, バッテリー併用法
モ ニ タ ー, 制 御	各種センサー	特に, ドリル空回り, 刃先荷重, バレル内のコアの有無掘削状況モニター・収録方法
	信号の送信	ドリルコンピューター, コンピューター区画の耐圧性と保温性, ノイズ対策, 高速送信
	自動制御	ウインチ制御, 保温
ド リ ル 昇 降	液抵抗の軽減	液抵抗を最小とする外形, ドリル上昇・下降時の液の流路の確保
	液封液の選択	低粘性・無毒・無害・低燃性の液体

くつかの点で改良を重ねた。この結果、アンチトルクについても技術的な解決を見た。また、安定した掘削に不可欠な掘削状況のモニターと自動制御についても、ドリル内に組み込んだコンピューターを改良することにより、地上への高速通信を実現するめどが立った。20 m掘削実験塔でのドリルの液中昇降テストにより、流路抵抗となるドリルの形状について重要な知見を得た。高圧切削テスト用の実験装置と耐圧試験装置も作成し、実験を行うこととなった。

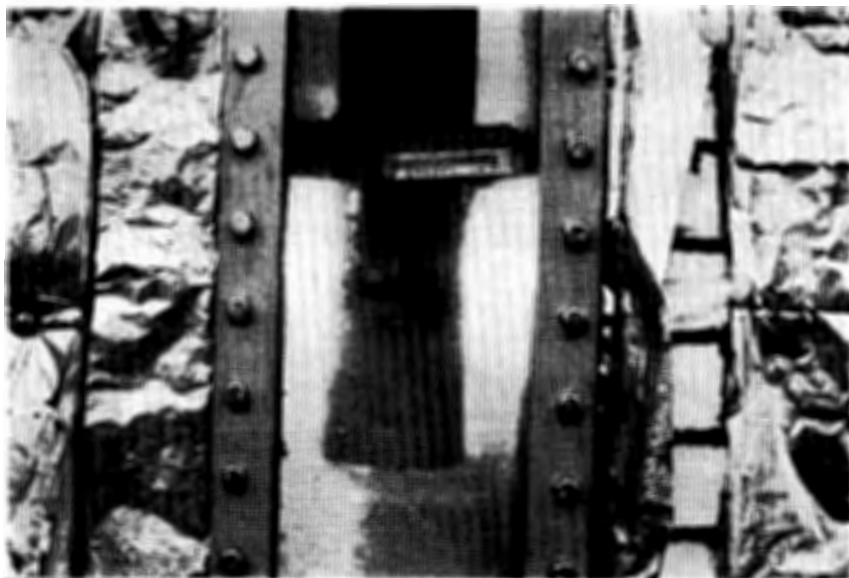
ケーブルの軽量化のため、ドリルモーターを内蔵バッテリーで駆動することを検討した。資料を湯浅電池(株)より提供していただき検討したが、バッテリーで 600 W を受け持たせても充電電流が 3 A (100 V) と大きくケーブルの軽量化につながらないことが判明し、バッテリー併用方式を断念した。

3) 第 3 段階 (1990 年度) 以降の予定

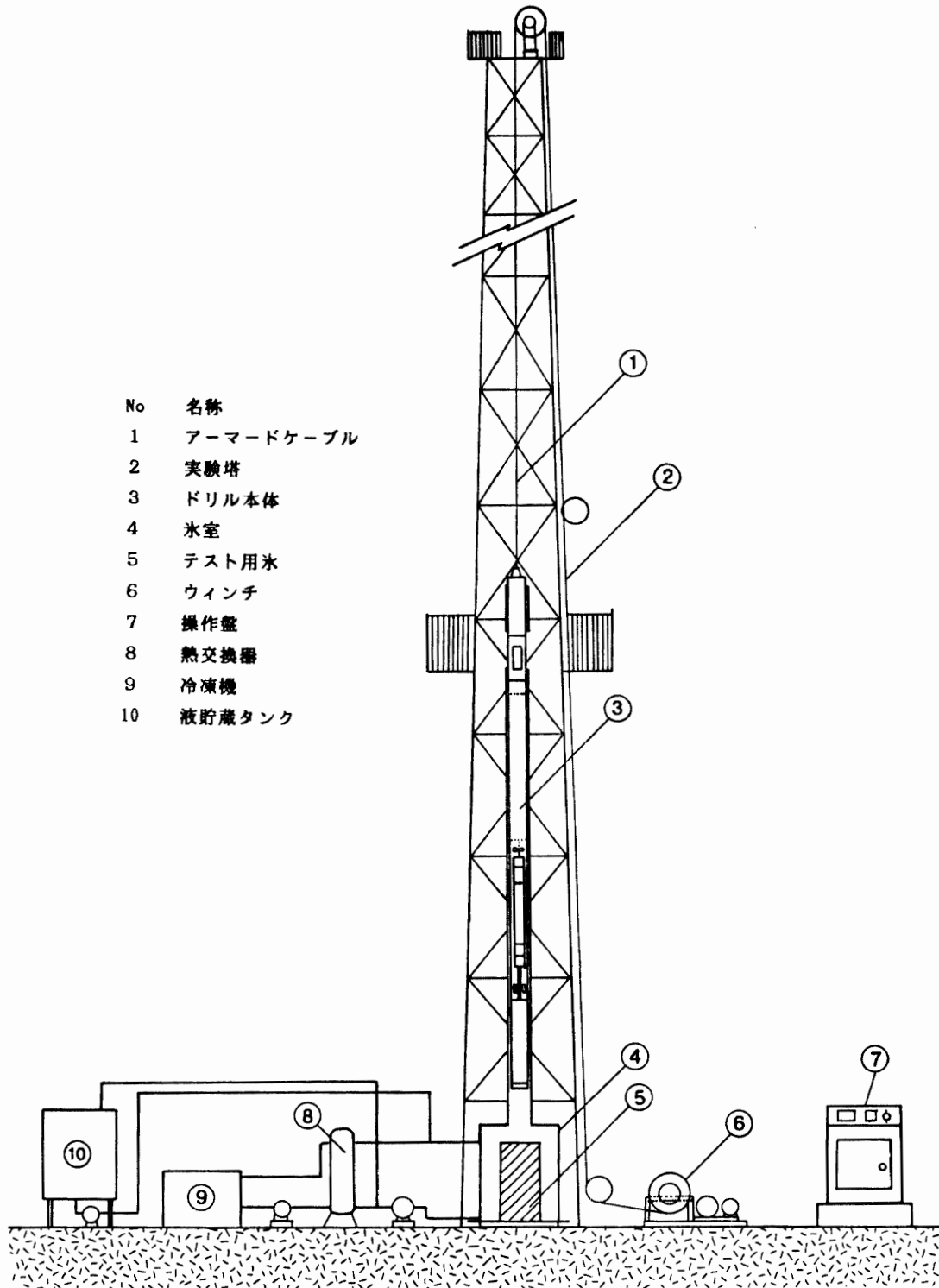
開発の最終年度として、これまでの 2 カ年の実験結果を整理・検討し、A, C 型についての実用型(実寸大)ドリルの製作と実験を行う。この他、ウインチ, ドリルマスト, コントロール装置の製作を行い、実用型の深層掘削ドリルの開発を一段落させる。ここでは、ウインチおよびコントロール装置については、技術的にほぼ確立されており問題ない。しかし、



a. 20 m タワー



b. タワー下部の液封水室



c. 概念図

図 1a-c 掘削実験塔

Figs. 1a-c. 20-m tower for experiment of ice coring in liquid-filled hole.

ドリルが約 10 m と長くなるため、ドリル自体を持って横たえることができず、起倒式マストの開発をする必要がある。この3カ年で開発された深層掘削装置は、国内での実験や1991年以降の北極圏その他の地域での総合掘削実験などで繰り返しテストを行い、最終改良をすることになる。

4. メカニカルドリルの選択

ドーム計画の深層掘削ドリルとして、エレクトロメカニカルドリル方式を選択した。エレクトロメカニカルドリルは、これまでグリーンランド Dye-3 での深層掘削 (1979-1980) で使用された他、ヨーロッパ連合の GRIP (1990-) やアメリカの GISP-II (1990-) での使用が予定されている。一方、サーマルドリルは、乾式掘削としては、みずほ基地での 700 m 掘削 (1983-1984) やフランスによるドーム C (1977-1978) での 905 m の掘削で使用された。また、サーマルドリルによる液封掘削 (深層掘削) としては、ソビエトのポストーク基地で 2400 m (1975-) 掘削の例を挙げることができる。

浅層掘削ではメカニカルドリルの使用が一般的だが、中・深層掘削では、サーマルドリルもよく使用されてきている。それぞれ掘削方式としては一長一短があり、一般的にはこれまでの掘削経験から表3のようにまとめることができる。

表3 深層掘削用のメカニカルドリルとサーマルドリルの比較
Table 3. Comparison of a mechanical and a thermal drills for deep ice coring.

	メカニカル方式	サーマル方式
採集コア長	● 短い (~3 m)	○ 長い (~10 m)
掘削速度	○ 早い (20-40 m/h)	● 遅い (2-4 m/h)
掘削消費電力	○ 少ない (0.5-1 kW)	● 多い (4-6 kW)
ケーブル重量	○ 軽い (500 kg/km)	● 重い (1000 kg/km)
構造	● 複雑	○ 単純
コアの質	○ 良好	● 悪い (クラック発生)

先に示した条件下で行われるドーム計画での掘削方式は、エレクトロメカニカル方式がよいのか、それともサーマル方式がよいのか、まずこの検討から行った。

4.1. 掘削時間からみたコア長と掘削時間

掘削全体に要する時間 (T) は、ウインチによるドリルの昇降時間 ($D^2/(L \cdot V)$)、ドリルによる氷の掘削時間 (D/v)、地上での作業時間 ($S \cdot D/L$) の合計として次式で与えられる。

$$T = D^2/(L \cdot V) + D/v + S \cdot D/L, \quad (1)$$

ここで、 D : 目標掘削深度 (m),

L : ドリルバレル長 (採集コア長, m),

V : ウインチ巻き上げ, 巻き下げ速度 (m/h),

v : ドリルの掘削速度 (m/h),

S: 地上での作業時間 (h).

この式から、ドリル本体の性能に関係のない掘削目標深度 (D), ウインチの性能 (V) と、地上作業時間 (S) を $D=2500$ m, $V=2500$ m/h, $S=0.5$ h など一定と考え、また、メカニカルドリルとサーマルドリルの L (バレル長) を表3よりそれぞれ 2-3 m, 5-10 m とし、また v (ドリルの掘削速度) として、同じく表3より 20-40 m/h, 2-4 m/h と仮定すると、掘削に要する総時間は、メカニカルドリルで 1300-2000 時間、サーマルドリルで 1000-2000 時間と推定される。

このように、掘削に要する時間は、メカニカルドリルでもサーマルドリルでも、ほとんど優劣がないといえる。しかし、サーマルドリルの L を 10 m とした場合、ドリルの全長は 16 m 以上にもなると予想される。これは、周辺設備の規模の拡大につながり、輸送物資量の軽量化にならない。

4.2. 消費電力の比較

掘削に要する電力は、表3にあるように、一般的にはメカニカルドリルで 0.5-1 kW, サーマルドリルで 5 kW ほどである。また、掘削速度は、それぞれ 20-40 m/h, 2-4 m/h なので、2500 m の氷の切削そのものにかかる時間は、62-125 時間、622-1250 時間となる。すなわち、2500 m の掘削で消費される積算電力は、メカニカルドリルで 31-125 kWh, サーマルドリルでは、メカニカルドリルの 50-100 倍の 3110-6250 kWh となる。

この氷の切削そのものにかかる消費電力を次のように発電機の消費燃料に換算してみる。16 kVA 発電機を想定すると、燃費は約 0.6 l/kWh なのでメカニカルドリルで 5-20 l, サーマルドリルで 500-1000 l となる。この差は大きいですが、絶対量では、500 kg から 1000 kg の重量の差でしかなく、ドーム基地への輸送物資量の全体 (200 t) から見れば、0.5% 以下に過ぎない。

しかし、メカニカルドリルとサーマルドリルとのこの大きな消費電力の相違は、ケーブル径の相違→ケーブル重量の相違→ウインチ負荷の相違→消費燃料の相違となっており、輸送物資量の大きな相違になる。メカニカルドリルの場合を検討してみる。ドリル部の消費電力を 200 V, 0.8 kW とし、ケーブルの耐圧電圧を 600 V, 従って電圧降下を 400 V と想定すると、ケーブル抵抗は 100 Ω となる。一方、サーマルドリルの場合、ドリル部の消費電力を 400 V, 5 kW とし、ケーブルの耐圧電圧を 600 V とすると、電圧降下が 200 V となり、ケーブル抵抗は 16 Ω となる。

3000 m の長さ (往復で 6000 m) でこうした抵抗を持つケーブルを、R 社のアーマードケーブルで考えてみる。メカニカルドリルの場合、抵抗が 100 Ω (6000 m あたり) のケーブル重量は、3000 m で 630 kg となる。サーマルドリルでは、抵抗が 16 Ω (6000 m あたり) のケーブル重量は、3000 m で 3000 kg となる。

ケーブル荷重 (W : ケーブル重量+ドリル重量) とウインチの巻き上げ速度 (V), ウィン

チモーターの出力 (P) との関係は、次式で与えられる。

$$P = W \cdot V / (a \cdot e) . \quad (2)$$

ここで、 a は定数で ($6120 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min} \cdot \text{kW}$)、 e は機械効率で 0.5 とする。また、ウインチの巻き上げ速度として、平均 $50 \text{ m}/\text{min}$ 、ドリル荷重 150 kg を仮定すると、メカニカルドリルでは、ウインチモーターとして、 7.5 kW が必要となる。一方、サーマルドリルでは、 30 kW となる。

2500 m 掘削の場合、ウインチの総使用時間は、式 (1) の第 1 項で与えられ、コア長 (L) として 2 m 、ウインチ巻き上げ速度 (V) として $3000 \text{ m}/\text{h}$ とすると、 1050 時間となる。

従って、ウインチ使用による総消費電力は、メカニカルドリルで 7875 kWh 、サーマルドリルでは、この 4 倍の 31500 kWh となる。この電力量は、発電機のエンジン燃料に換算して、メカニカルドリルで 4.7 t 、サーマルドリルで 19 t となる。この燃料は、ウインチの駆動のみに必要な量である。実際には、ウインチモーターの出力から、メカニカルドリルで 16 kVA 、サーマルドリルで 45 kVA 程度の発電機が必要である。この発電機を 1 日 10 時間以上、1 年間 200 日以上で 2 カ年の発電機の運転を考えると、それぞれ 30 t 、 100 t ほどの燃料が必要で、その差はきわめて大きくなる。従って、消費電力の大きなサーマルドリルでは、多量の発電機エンジン用の燃料が必要となるため、限定された輸送能力を考えるとサーマルドリルの採用は現実的でない。

4.3. コアの質

掘削システムの選択にあたっては、コアの割れや微小なクラックの発生など、コアの質を左右することについても考慮する必要がある。小さく割れたコアの破片やクラックの入ったコアでは、解析上さまざまな支障が生じる。サーマルドリルを用いたみずほ基地での 700 m 掘削では、 135 m 以深のコアでクラックが見られた (HIGASHI *et al.*, 1988)。このクラックは、ほぼ 200 m 以深では、 $5\text{--}10 \text{ mm}$ の間隔で見られた。サーマルドリルによるクラックの発生は、ドーム C コアやポストークでの深層コアでもある (私信による)。

これは、ヒーターによる急激な氷の昇温、膨張による応力のため生じるものであり、コアの質という点では、メカニカルドリルが優れているといえる (AD HOC PANEL ON POLAR ICE CORING, 1986)。グリーンランド Dye-3 での深層掘削 (GUNDESTRUP *et al.*, 1984) では、サーマルドリルでは質の良いコアが得られないとの理由で、メカニカルドリルが選択されている。

5. ドリル各部の検討

5.1. 切削チップの処理機構

液封メカニカルドリルの最も重要な機構は、切削チップの処理機構である。特に、チップ輸送機構を中心に提案された多数の型式の中から、下記の 5 タイプを選んで検討を行った。

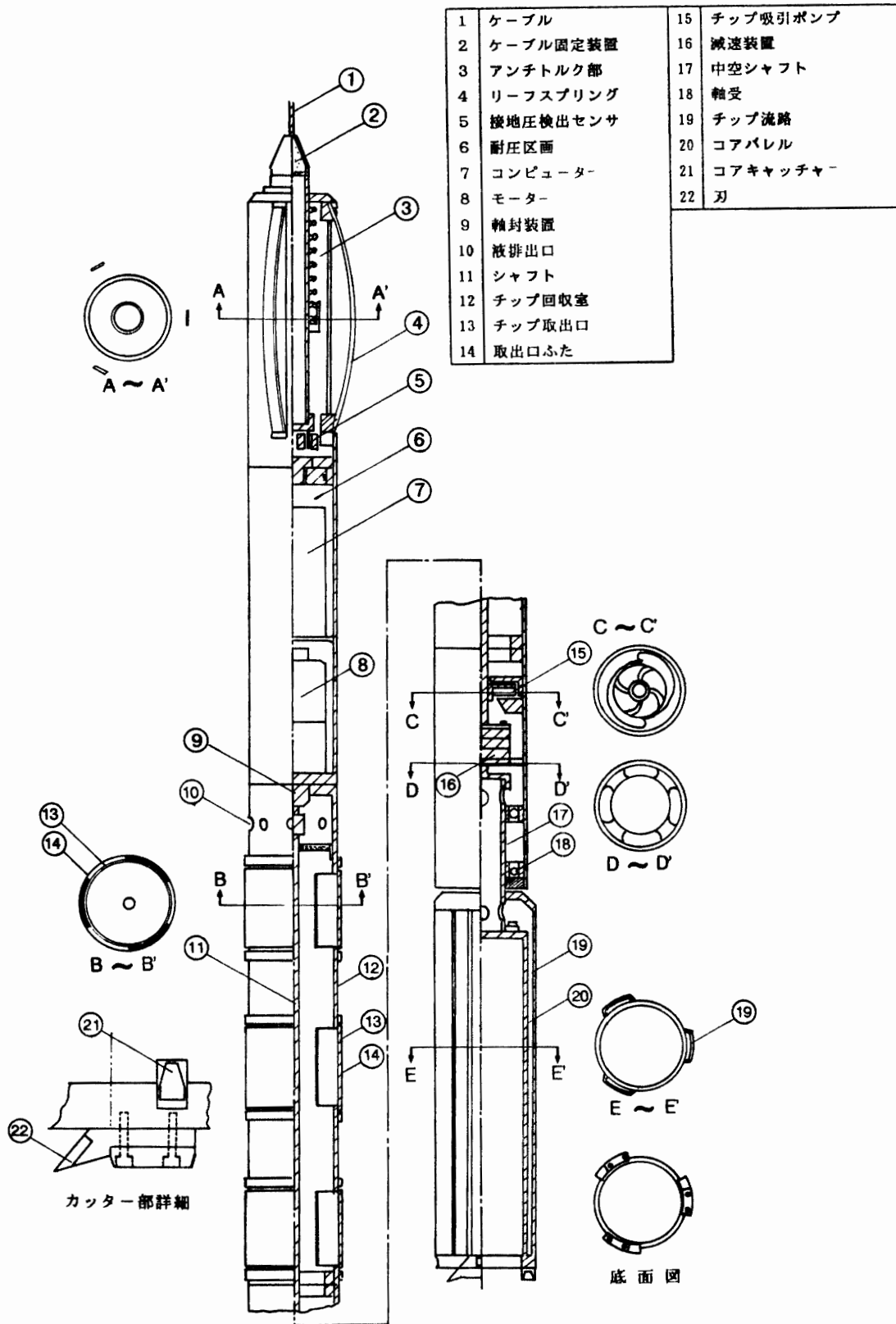


図 2 A型ドリルの概念図
 Fig. 2. Schematic diagram of the A type drill.

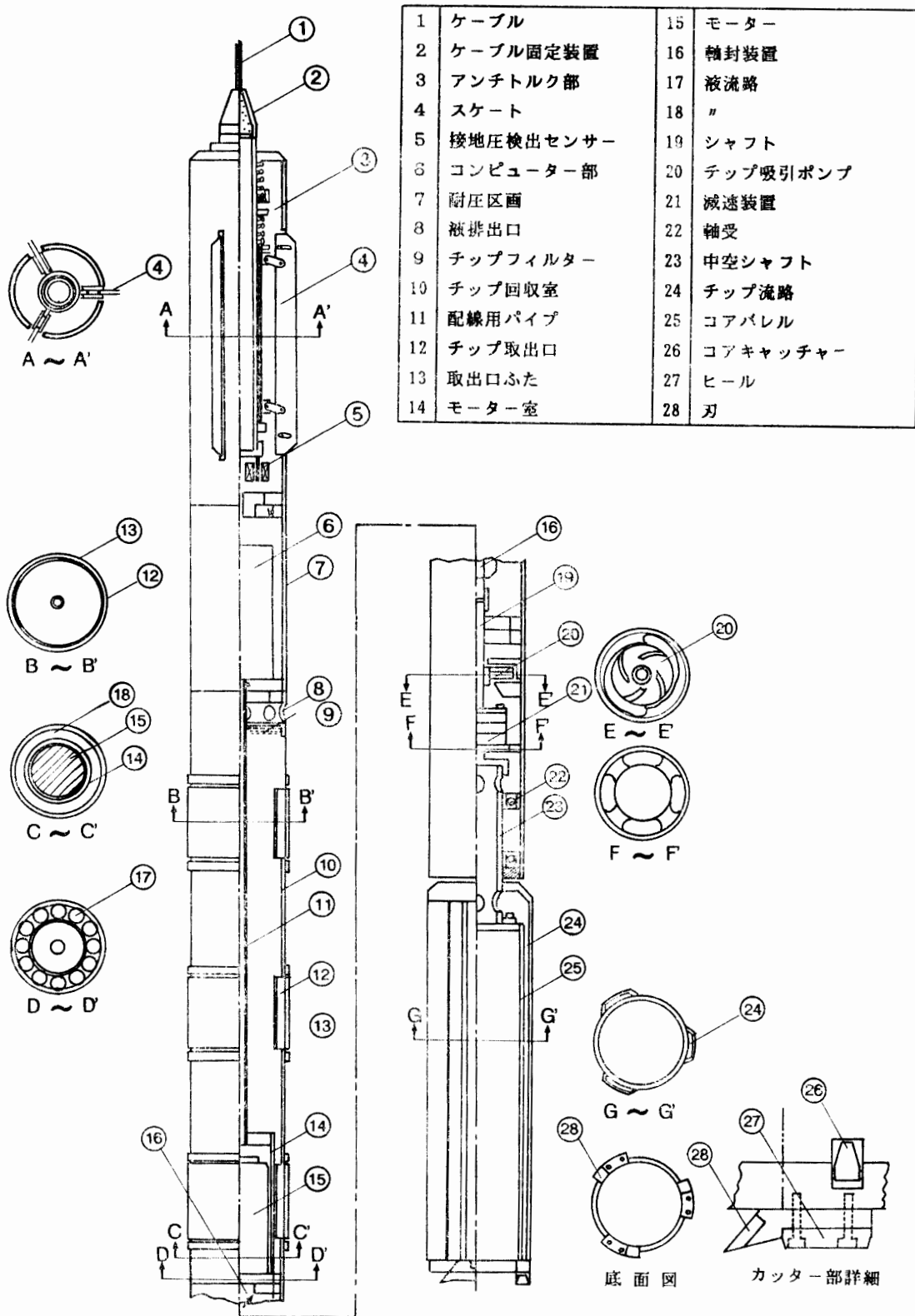


図 3 B型ドリルの概念図

Fig. 3. Schematic diagram of the B type drill.

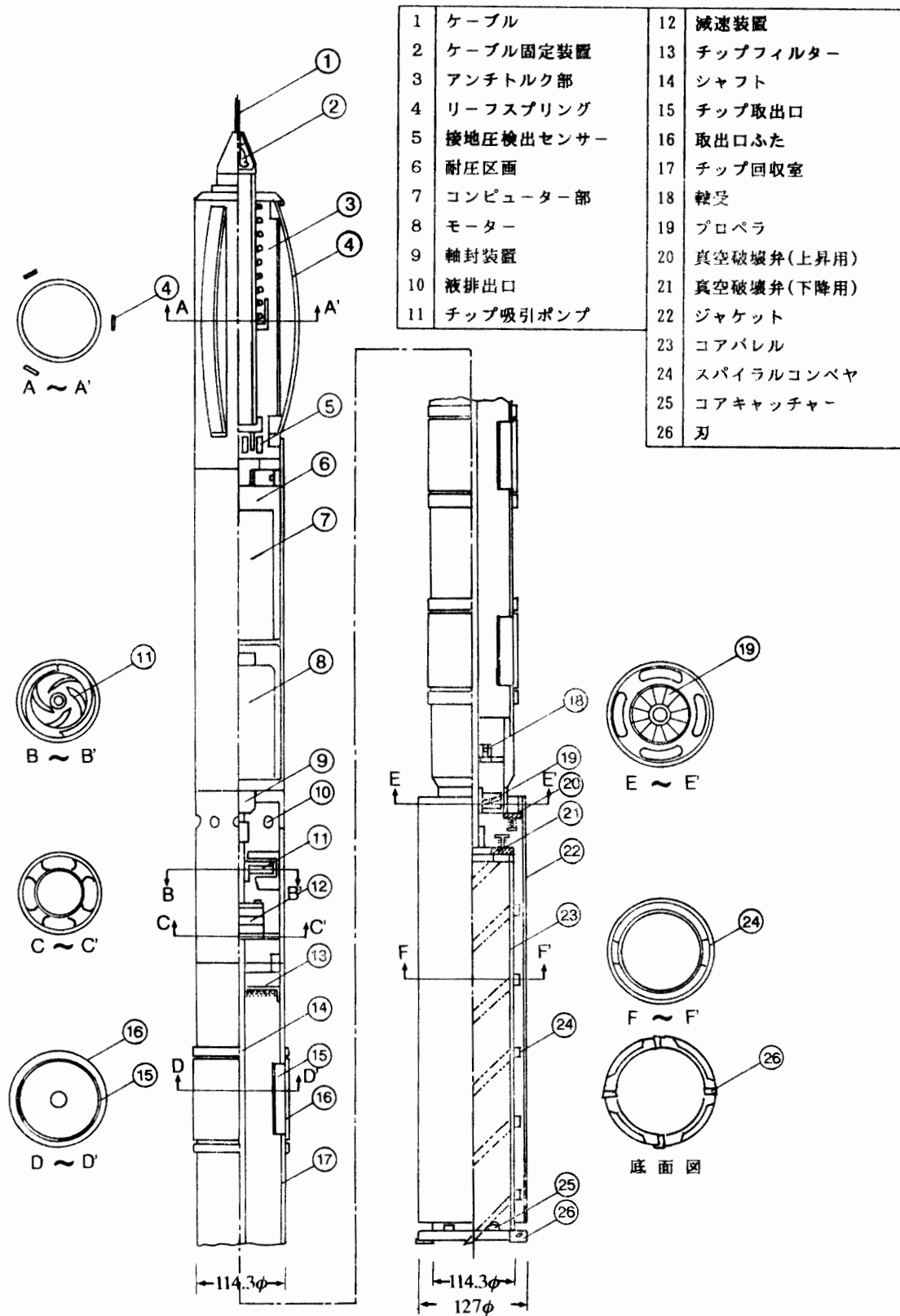


図4 C型ドリルの概念図
 Fig. 4. Schematic diagram of the C type drill.

なお、各型のパーツは互換性があり、一部の部品の取り替えのみで A→B→D→E と変えることができる。ただし、C型だけは基本的な機構を異にしている。

1) A 型 (図 2)

切削チップをコアバレル側面のチップ輸送パイプを通じポンプで吸引し、切削チップ回収室にて濾過貯蔵を行う。チップ輸送パイプ相互間の隙間は、ドリル昇降時の液移動のスペースとして確保してある。このため、ドリル昇降時の液抵抗が小さい。A型ドリルには、リーフスプリング型アンチトルク装置を取り付けた。上から図のように、アンチトルク装置、コンピューター室、モーター室、チップ回収室、チップ吸引ポンプ、減速機、コアバレルからなっている。

2) B 型 (図 3)

A型では、チップ回収室を貫通する長いシャフトを高速回転させなければならず、当然ブレや振動が予想された。そのため、モーター室のみ分離し、チップ回収室の下方へ移動させたものがB型である。チップはモーター室の周囲を流れるため、モーター室の直径はその分小さくせねばならず、高出力のモーターの製作に限界がある。アンチトルク装置の比較実験を行うため、B型のドリルには、スケート式のアンチトルク装置を採用した。構成は上からスケート式アンチトルク装置、コンピューター室、チップ回収室、モーター室、チップ吸引ポンプ、減速機、コアバレルからなる。

3) C 型 (図 4)

この方式は、基本的には SUZUKI and SHIMBORI (1986) によって考案された方式である。ジャケットおよびコアバレルは現在の表層用ドリルと類似した構造で、スパイラルのついたバレル (アルキメディアンポンプ) の回転によって生じる上向きの液流と、チップ吸引ポンプによりチップを輸送する。ジャケットと孔壁との隙間が小さく、ドリル昇降時に真空を発生する恐れがあるため、ジャケット上部に真空破壊弁を取り付けた。構成は上から、リーフスプリング式アンチトルク装置、モーター室、チップ吸引ポンプ、減速機、チップ回収室、ジャケット、コアバレルから成る。

4) D 型

B型のポンプのプロペラを逆ひねりして液を刃先から噴出させるよう考えたが、精巧、複雑なポンプを採用したため逆噴射は不可能となり中止した。

5) E 型

A型からポンプおよびバレル側面にあるチップ輸送パイプを撤去したもので、A型のパーツを取り替えることで対応できる。要するにチップ処理を全く行わず掘りっぱなしである。本機を使用する前提として、a) 液比重を氷より大きくしてチップを浮揚させる、b) 別装置により浮遊チップを回収する、などが必要である。

5.2. アンチトルク機構

ドリルをワイヤーケーブルでつるして掘削するエレクトロメカニカルドリルでは、ドリル本体の回転を防ぐ必要がある（アンチトルク機構の必要性）。このため、板バネを用いたリーフスプリング方式（REEH, 1984）や鈴木（1978）考案によるサイドカッター方式などのアンチトルク装置が必要である。サイドカッター方式は、掘削孔に細い溝を掘り、その溝にドリル上部に取り付けられた細長い金属ブレードが入ることにより、ドリルの回転を防止するというユニークな方式である。液封掘削では、切削チップに浮力を持たせるため、液の比重を氷よりわずかに大きくする必要がある。このことは、掘削孔径の拡大につながり、サイドカッター方式では溝から金属ブレードがはずれて、アンチトルク装置が効かなくなる危険性がある。このため、ここではリーフスプリング方式とスケート方式の2方式で、比較検討することにした。

1) リーフスプリング型アンチトルク装置

図5は、リーフスプリング方式のアンチトルク装置を示したものである。板バネは、幅30 mm、長さ700 mmで厚さ2.3 mmの鋼材である。当初、切削トルクに対するアンチトルクは、この板バネの孔壁への圧着による摩擦で生ずると考えた。しかし、6.2章で述べるように、低温室での実験で、板バネによるアンチトルクは、板バネの片側の縁が孔壁に食い込むようにして効果的に生ずることが分かった。このため、さらに効果的にアンチトルクを発生させるため、板バネの取付部を 20° ほど回転するようにした。この結果、切削トルクが大きくなるに従い、板バネが孔壁に食い込みアンチトルクが大きくなるようになった。

2) スケート型アンチトルク装置



図5 リーフスプリング型アンチトルク装置
Fig. 5. A leaf-spring type antitorque device.

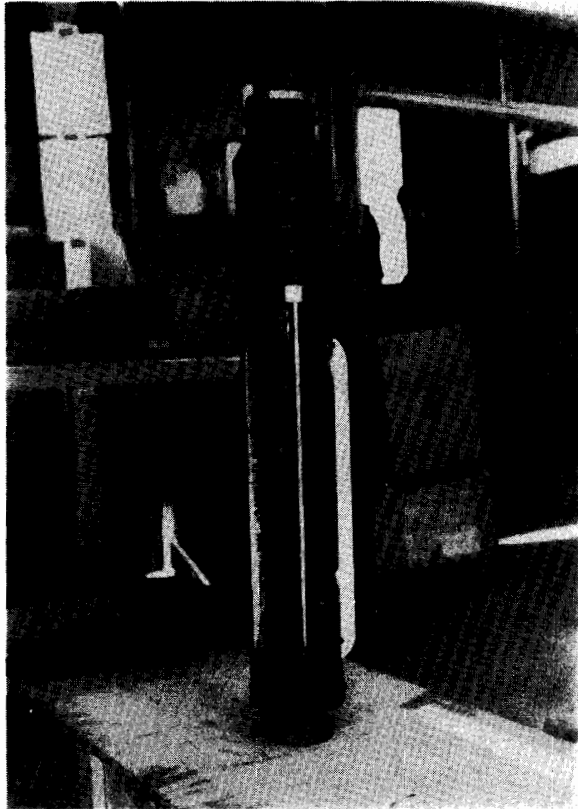


図 6 スケート型アンチトルク装置
Fig. 6. A skate type antitorque device.

スケート型のアンチトルク装置 (図 6) は、スイスで使用された機構である (RUFLI *et al.*, 1976). 長さ 400 mm, 幅 50 mm, 厚さ 5 mm の 3 枚のブレードが、孔壁を圧着する時の摩擦を利用するものである。当初、ブレードは、ドリル昇降時には孔壁から離れ、掘削時に孔の底に着くと孔壁に圧着するような機構を考えた。しかし、孔の底にドリルの刃が着いた状態でドリルを回転するのは、非常に大きな初動切削トルクが生じ、時に刃の食い込みによりドリルが回転しないことが起こった。このため、ドリル昇降時も掘削時も常に一定の力で孔壁に圧着する方式を採ることとした。

5.3. 切削機構

氷の切削機構において重量な要素は、刃の形状、刃先荷重、切削速度 (回転数) である。刃の形状は主に、すくい角、逃げ角、出しろなどの要素が重要であり、必要動力、切り込み、掘進速度、コアの良否などに影響を与える。刃先荷重は、ドリル全重量のうちケーブルで受け持つ重量を差し引いた刃先にかかる荷重で、掘削の安定性、掘進速度等に密接に関係する。また、切削速度 (回転数) も掘進速度、必要動力等に関係するが、液中でのかくはん抵抗に及ぼす影響は良くわかっていない。しかし、切削機構を支配するこれらの要素については不明なことが多い。特に、液中での切削、低温域 ($-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$) での切削、高圧下 (300 kg/cm^2) における切削に関する資料は、ほとんどない。そこで、メカニカルドリルの切削特性を把握し、効率の良い切削を実現するため、表層ドリルを用いて、刃の形状、刃先荷重、動力など

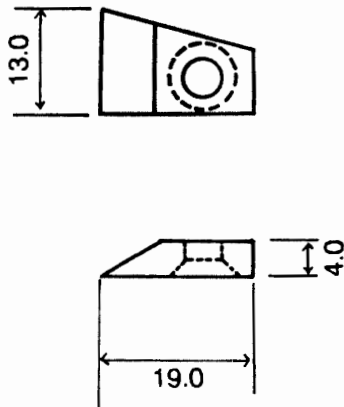


図 7 刃の形状
Fig. 7. A cutting edge.

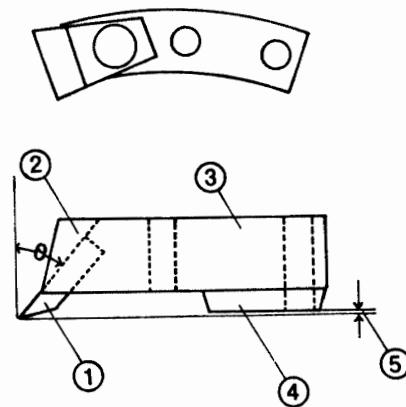


図 8 刃の取り付け台 (基本型)
Fig. 8. A cutting shoe (prototype).

- ① 刃
- ② チップ吸引ガイド
- ③ ヒール
- ④ 取付台
- ⑤ 切り込み
- ⑥ すくい角

を変えた切削実験を行った。この結果については、藤井ら (1988) の報告がある。

1) 刃

図 7 のような形状のもの 1 種類である。すくい角の変更は、刃の取り付け台を変えることにより行うこととした。材質は高速度工具鋼 JIS G4403 (SKH-9) である。刃および取り付け台は A, B, D, E 型ドリルすべてに共通で各バレルは 3 枚の刃を有する。

2) 刃の取り付け台 (基本型)

取り付け台の機能としては、刃のすくい角の変更、出しろの調節、切削チップを吸引口まで導く、等である。すくい角の変更は取り付け台を交換することにより行い、30°, 40°, 50°, 60° 用を準備した。刃の出しろはヒール (図 8 の④) の高さを変更することで行うことにしたが、これは刃の氷への切り込みの上限を決めるものであり、通常の切り込みは刃先荷重の調節を基本として行うこととした。

3) 刃の取り付け台 (改良型)

刃の取り付け台の基本型では、チップを効果的に吸引することをねらってガイドを付けたが、逆にここでチップの詰まりが起こった。このため、改良型 (図 9) では、ガイドを無くした他、取り付け台とヒールの長さを十分に確保した。

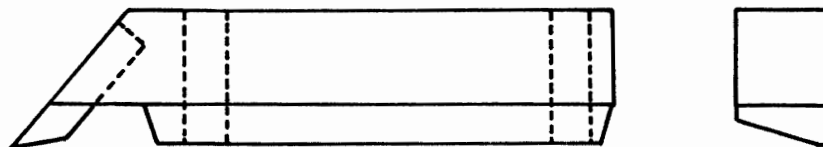


図 9 刃の取り付け台 (改良型)
Fig. 9. A cutting shoe (improved).

4) C 型ドリルの刃

C 型ドリルでは、刃は特別の取り付け台を介せず直接バレル底部に取り付けた (図 10)。C 型ドリルでは、切削チップの輸送をバレル外側のスパイラルとジャケット内側のリムとの

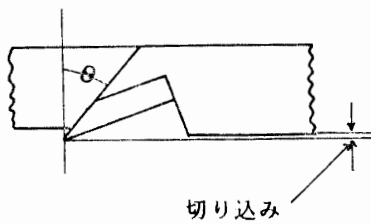


図 10 C型ドリルの刃とその取り付け状態

Fig. 10. A cutting shoe with edge of the C type drill.

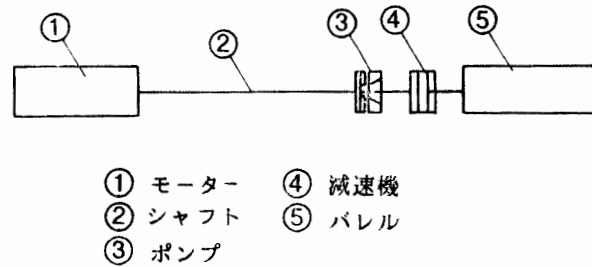


図 11 ドリル駆動系概念図

Fig. 11. Scheme of drill driving system.

間で生ずる上向きの液流で行う。このため、スパイラル入口までの距離を短くしチップの取り込み効率を上げるため、刃を直接バレル底部に取り付けた。すくい角、刃の出しろの調節は形状の異なった刃の交換により行う。

5) その他

a) 刃先荷重の調節

ドリル上部に取り付けたアンチトルク機構内のスプリングは、ドリル全荷重をうける。刃先荷重は、このスプリングの伸縮をポテンショメーターにより検出し、ドリル内コンピューターによりデジタル信号化して地上の操作盤上へ送信、表示させる。この刃先荷重値が一定になるよう、ケーブルの自動繰り出しをした。なお、実験ドリルの全荷重は機種によりやや異なるものの約 80 kg である。

b) 回転数の調節

駆動装置 (図 11 に系統図を示す) として直流モーター (高丘製作所製, DC ブラシレスモーター, MSX-600) を利用しているため、入力電圧を変化させることにより自由に回転数を変えることができる。安定した吸引を維持するため、チップ吸引ポンプの回転数を 1500-2500 rpm とし、ポンプ下部に減速装置 (マテックス製, 遊星歯車減速機 LGU-75) を設け、バレル回転数を 40-150 rpm の範囲で使用するようにしている。

5.4. 掘削制御・モニター機構

深層掘削システムの中で制御・モニター機構に対する基本的な要求は、ドリルのコントロール機能の向上と、故障・事故の防止である。

ドリルのコントロール機能の向上は、作業人数をできるだけ少なくしたり、エキスパートでなくても掘削作業ができるようになる点が必要である。また、故障・事故の防止は、作業効率の向上と所要日数の短縮、掘削作業の安全性といった観点から重要である。

これらの要求を満たすためには、掘削過程の自動化、特に、切削過程とドリルの昇降過程の自動化が掘削制御機能の目標となる。また、装置や環境の状態を常時監視し記録しておくことは、作業工程の管理や機械装置のメンテナンス上必要である。そこで、装置の動作状態

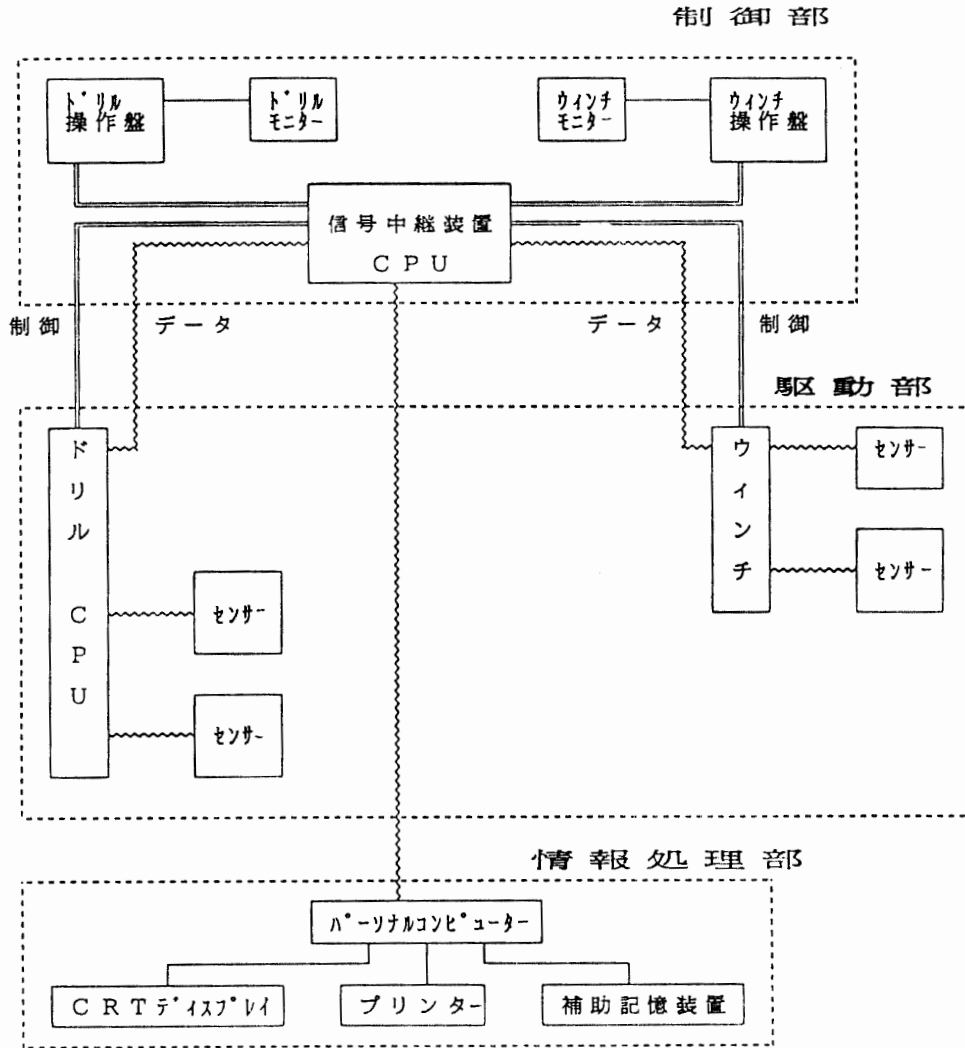


図 12 信号系統概念図 (ドリル以外はすべて地上にある)
 Fig. 12. Schematic diagram of the sensor-signal unit.

と動作環境の監視および記録を自動的に行うことが、モニター機構の目標となる。

信号系統からみた場合、掘削装置は制御部、駆動部、情報処理部の3部分から構成される。図 12 に概念図を示す。

制御部は、ドリルおよびウインチのコントローラーから成り、ドリル本体とウインチの動作を制御する。つぎに、駆動部は、ドリル本体、ウインチおよびセンサーから成り、制御信号を受けて実際に作動する。また、各種センサーのデータ信号を変換して制御部および情報処理部にデータを送信する。最後に、情報処理部は、コンピューター、プリンターおよび補助記憶装置から成り、駆動部からのデータを一次処理して分かりやすく表示する。また、駆動部からのデータを記録として効率よく保存する。さらに、保存したデータを二次処理し、分かりやすく表示する。

図 12 のうち現段階では、ほとんどの部分がテスト機に組み込まれている。以下では、制

表 4 ドリル系装置のモニター項目
Table 4. Items of drill monitoring in borehole.

モニター項目	使用センサー	送信データ長 (バイト)
モーター電圧		2
ドリル回転数	ホールセンサー	2
接地圧	ポテンショメーター	2
(自転警報)		1
(コア上限警報)		1
液 圧	圧力センサー	2
液 温	白金抵抗体	3
モーター室温度	〃	3

御機構とモニター機構について、実際の装置に即して説明する。

1) ドリル系装置

ドリル本体に収納され、地上から供給される電源で作動する装置で、その機能は以下の通りである。

- a) ドリルモーターを駆動する。
- b) 各種センサーからの信号を変換し、地上に送信する。

表 4 にモニター項目を示す。

2) 地上系装置

地上系装置は、ドリル操作盤、ウインチ操作盤、信号中継装置、パーソナルコンピューターから成る。全体としての機能は以下の通りである。

- a) ドリルへ駆動電源を供給する。
- b) ドリル系装置からの信号を受信する。
- c) ウインチ制御信号をウインチコントローラーへ送信し、ケーブルの繰り出し制御を行う。
- d) 地上系装置の各種センサーからの信号を変換する。
- e) モニターデータをパーソナルコンピューターに表示、保存する。

表 5 に地上系装置のモニター項目を示す。また、表 6 にデータ通信の方式を示した。

こうした地上系装置の機能のうち c) は、自動掘削にかかわる重要な機能である。これは、ドリル系装置から送信される接地圧信号 (ポテンショメーターの出力) を判断して、ケーブルの繰り出しを調節するようにウインチを制御するものである。すなわち、刃先荷重がより高い場合には、ドリルの刃先が氷にくい込んだり、コアサンプルの質が悪くなる可能性が高くなる。このような際には速やかにケーブルの繰り出しを止め、刃先荷重の増加を抑える必要がある。逆に、刃先荷重が低すぎると掘削速度が下がり、作業効率が悪くなる。このときには、適当な刃先荷重を保持するようにケーブルを繰り出さなければならない。

表 5 地上系装置のモニター項目
Table 5. Items of drill monitoring at the surface.

モニター項目	使用センサー	送信データ長 (バイト)
モーター電流		3
供給電圧		4
(ケーブル速度)		4
ケーブル繰出長		5
(ケーブル張力)		4
気 温	白金抵抗体	4

表 6 ドリルの信号通信方式
Table 6. Specifications of signal communication.

	ドリル系装置と地上系装置	信号中継装置とパーソナルコンピューター
通信速度	300 bps	1200 bps
同期方式	調歩同期式	調歩同期式
データ長	8 bit	8 bit
パリティ	偶数	なし
ストップビット	1 bit	1 bit
誤り制御	CRC チェック	なし
通信方式	カレント・ループ伝送 (電流値: 20 mA)	RS-232C 準拠
通信プロトコル		無手順

このように刃先荷重の調節は、ウインチを制御してケーブルの繰り出し速度を調節して行う。そこで、制御機能の最重要点は、

- 1) ドリル系と地上系とのデータ通信を安定かつ確実にを行うこと。
- 2) 最適な刃先荷重を見だし、設定すること。

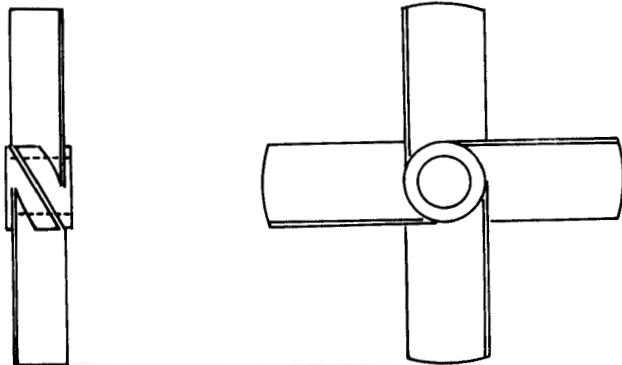
である。

1) に関しては、3000 m の距離を確実にデータ通信するために、通信方式としてカレントループ伝送を、また誤り制御方式として CRC チェックを採用している。なお、2) に関しては藤井ら (1988) の報告が参考となるものの、今後切削実験を通じて実現すべき課題である。

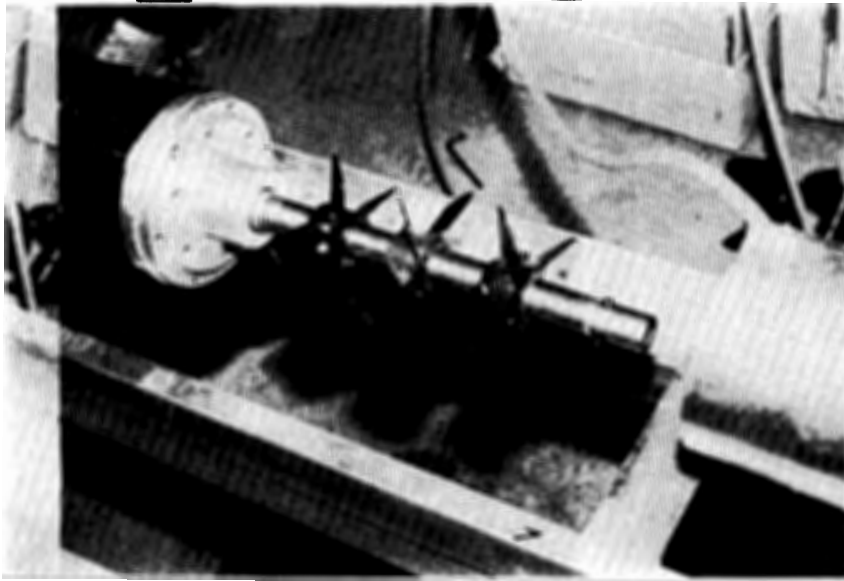
6. ドリルの開発実験

6.1. 切削チップの輸送実験

切削チップの輸送機構の開発は、液封深層ドリル開発で最も重要な課題である。このため、前述したように、チップ輸送・処理の機構として A から E までの 5 つの異なった方式について実験した。また、こうしたドリルの基本構造とともに、チップ輸送に重要な吸引ポンプの開発に力をいれた。

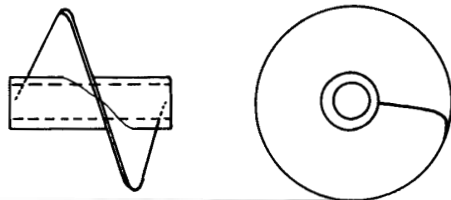


a. 平面・側面形状図

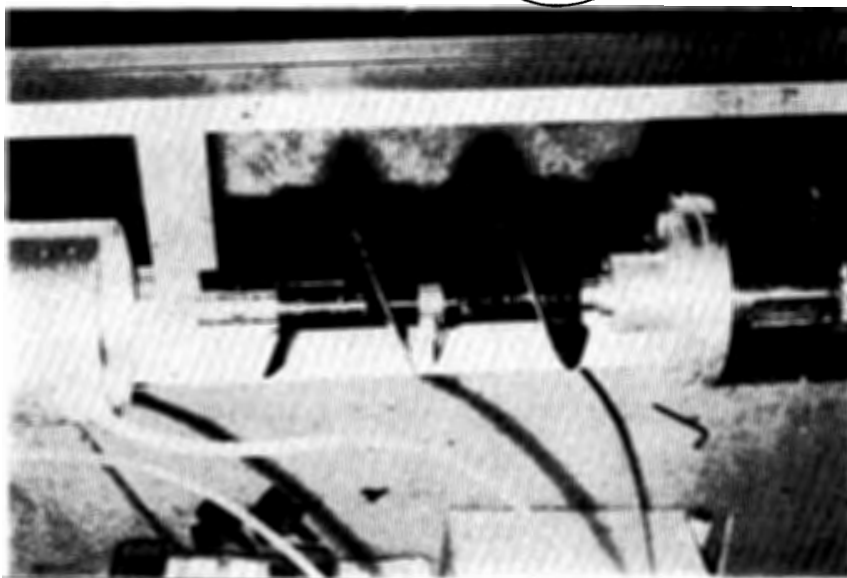


b. 3段に取り付けたよう
す

図 13a,b チップ吸引ポン
プ; プロペラ型
Figs. 13a, b. Chip pump
(propeller type).



a. 平面・側面形状図



b. 2段に取り付けたよう
す

図 14a,b チップ吸引ポン
プ; スクリュー型
Figs. 14a, b. Chip pump
(screw type).

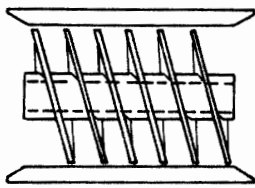


図 15 チップ吸引ポンプ; 改スクリー型
Fig. 15. Chip pump (new screw type).

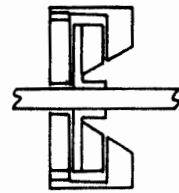
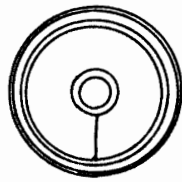


図 16 チップ吸引ポンプ; うずまき型軸流ポンプ
Fig. 16. Chip pump (whirlpool type).

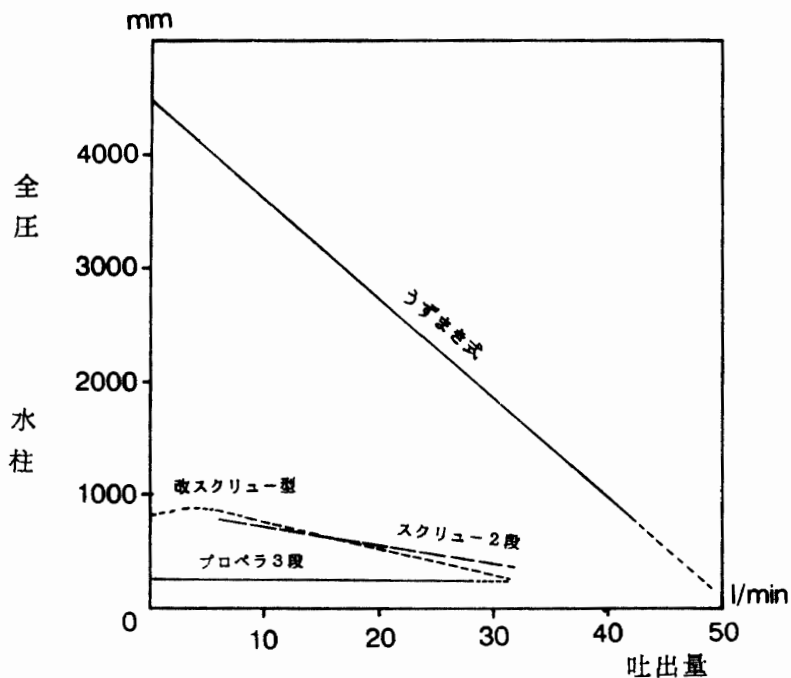


図 17 チップ吸引ポンプの性能比較 (2000 rpm)
Fig. 17. Comparison of pump performance.

切削チップ吸引ポンプとして、以下に示すように4タイプのポンプを試作し、基本的な性能比較を行うとともに、各ドリルと組み合わせて実際の掘削試験を行った。

1) チップ吸引ポンプの種類

- a) プロペラ型 (図 13): 回転軸に斜めに取り付けた4枚のプロペラを1段~3段重ねて使用する。
- b) スクリュー型 (図 14): 回転軸にらせん状に取り付けたスクリーを1段又は2段重ねて用いる。
- c) 改スクリー型 (図 15): らせん状のスクリーを5周巻にしたもの。
- d) うずまき型軸流ポンプ (図 16): うずまき状に4枚のヒレの回転による遠心力を利用したポンプ。

2) ポンプの吸引性能比較

各ポンプの吸引性能実験を水を用いて行い、図 17 の結果を得た。プロペラ型においては

1 段, 2 段, 3 段の場合をスクリー型においては 1 段, 2 段の場合を実験した。他は 1 段のみである。プロペラ型, スクリュー型のポンプは, 板金加工で製作されており, さらに精密加工を行い, ガイドとのクリアランスを極少にすれば, 図のようなフラットな性能曲線にならず, 圧力性能も向上するはずである。この実験から, 次のような結果を得ることができた。

- a) プロペラ型, スクリュー型, 改スクリー型のポンプとも圧力, 流量が少ない。
- b) 上記三種はフラットな曲線を示す。本来は右下がりの曲線になるはずである。
- c) うずまき型軸流ポンプは, 流量, 圧力とも大きく, 本来の右下がりの特性曲線になっている。

比較検討の結果, プロペラ型, スクリュー型のポンプは, 単純な構造に魅力があるが, 吸引性能が劣る。そこで最も吸引性能の高かったうずまき型軸流ポンプを採用することにした。ただし, ここに掲げる評価は, 今回の実験ドリルに限定した場合のことであり, 各ポンプの普遍的な特性を意味するものではない。

3) A, B 型ドリルのチップ回収実験

A 型および B 型ドリルに前記各ポンプを取り付け掘削実験を行った。プロペラ型, スクリュー型, 改スクリー型の 3 機種 of ポンプはほとんど使用に耐えなかった。チップの吸引力が弱く, バレル周囲に次第にチップが堆積し, 15-20 cm 掘削すると回転抵抗が増加し, 停止せざるを得なかった。当然回収されたチップもきわめて少量であった。チップが輸送される流路の抵抗を減らしたり, チップ取り出し口のシール性能を向上させる等の改造を行った。しかし, チップ回収率はやや向上したものの吸引力は十分でないまま, これらのポンプによる実験を終了した。

一方, うずまき型軸流ポンプは非常に好調で, 100% 近い回収率であった。そのため, チップ回収室が満杯になるまで掘削を継続することができた。他のポンプの場合問題であったチップ取り出し口のシール性能も, ほとんど問題とならず, ポンプの性能が十分であれば確実に回収できることが判った。なお, 刃の取り付け台のチップ吸引ガイドは, 次第に幅が狭くなっていったため, しばしばチップの詰まりを起こした。このため, 実験途中でこのガイドを除去した。

4) C 型ドリルのチップ回収実験

C 型ドリルは, チップ回収室上部のうずまき型軸流ポンプでチップを吸引するとともに, コアバレルのスパイラルによりチップの輸送を行う。このため, チップの輸送力は非常に良好で, 国内実験では未回収のチップはほとんどなく常に安定した掘削をすることができた。なお, 回収室に回収されたチップの密度を測定したところ, $0.3-0.35 \text{ g/cm}^3$ であった。これによりコアバレルとチップ回収室の長さ比を計算することができる。一方, 南極での実験では, 以下のような問題点が指摘された。

- a) コアバレル頂部にチップが詰まる。このため、頻繁にコアバレルを取り外してチップを除去しなければならない。この原因は、バレル回転シャフトの軸受けを取り付けたので、チップの流路が狭く複雑になっているためである。
- b) 減速機内にチップが侵入し、ギアかみを起こす。これは、他のドリルについても共通していえる事である。
- 5) E型ドリルのチップ処理

E型ドリルは、チップの処理機構を持たず、チップは液中に浮揚するにまかせる。本機の実験は、主として1990年1月南極あすか観測拠点（あすか）周辺の裸氷上で行った。チップを浮揚させるため、液比重を0.95に調整した。順調に掘削を進めたが、深さ約25mにおいてバレルの空転が起こり、進まなくなった。原因は孔底にチップがつまりドリルが空転したためと思われる。0.95の液比重では、刃の周辺からのチップの浮揚が、チップの生産に追いつかず、孔底にチップが次第にたまったためと考えられる。液比重をこれ以上大きくすると、孔径の拡大速度が大きくなるため、E型ドリルのみの使用は、実用的でない結論づけることができよう。

- 6) 浮遊チップ回収器

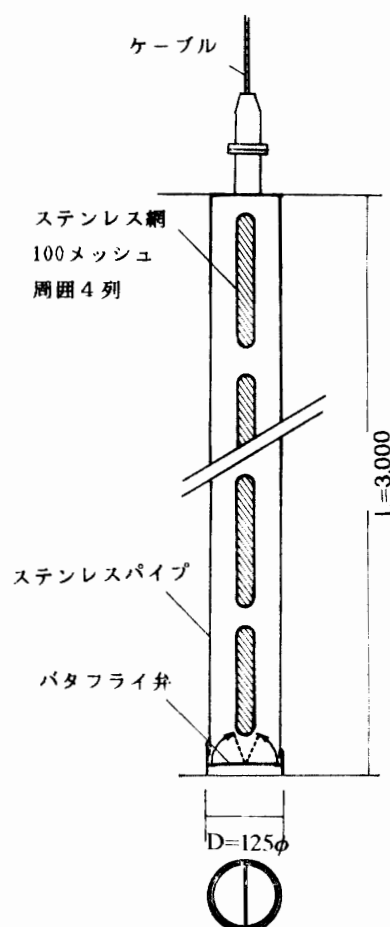


図 18 浮遊チップ回収器の概念図
 Fig. 18. Schematic diagram of the down borehole filter.

掘削時に取り残し液中に浮遊するチップを回収する装置で、降下時には液流によりバタフライ弁が開きチップを取り込み、上昇時にはバタフライ弁を閉じチップの流出を防止する構造を持つ(図 18)。1990 年 1 月あすかにて E 型ドリルとともに実験を行った。回収率に関しては測定していないが、1 回の使用では取りきれず 2 回目の使用においても相当量捕捉できたことから、高い回収率ではなかった。チップをろ過するフィルターの目の大きさか、回収器の直径部分と孔壁との隙間に問題があると思われる。

7) まとめ

掘削チップの輸送、処理に関してはうずまき型軸流ポンプの採用により、実用に耐えうる方法を確立することができた。しかし、引き続きいくつかの点において研究・改良を行う必要がある。以下に、切削チップの輸送機構に関する今後の課題をあげる。

- a) チップ回収室が実寸大 (3~4 m) となったとき、チップによるろ過抵抗とバランスするポンプ圧力との関係
- b) ギヤへのチップかみこみの解消
- c) チップ取り出し方法の合理化 (噴流で洗い流すなど)
- d) チップ流路の抵抗の低減化

6.2. アンチトルク装置の実験

今回試作した 2 種類のアンチトルク装置の実験を 1989 年 8 月-10 月に低温室で、また 1990 年 1 月あすか近くの裸氷上で行った。低温室の実験では、市販氷に浅層ドリルを用いて掘削孔と同径の孔 ($\phi 133-135$ mm) をあけ、アンチトルク装置をそう入後人力で回転力を与え、バネばかりによりすべり始めのトルクを測定した。低温室では氷の寸法上アンチトルク装置をドリルからはずし単体で実験した。一方、南極での実験はアンチトルク装置に関しても非常に有意義であった。

1) リーフスプリング型アンチトルク装置

スプリングブレード (板バネ) はステンレスバネ鋼を素材とし、長さ 700 mm、幅 30 mm で薄いもの (1 mm) 厚いもの (2.3 mm) の 2 種類を準備した。エッジは鋭く、これを氷壁に当てて回転を防止する。こうしたブレードをドリル周上に 120° ごとに 3 本取り付けた。

また、ブレード上下の取り付けスパンは、調節が可能でこのスパン変更により、ブレードの湾曲度を変え孔径に適合させることができる。リーフスプリング型アンチトルク装置の実験結果は下記の通りである。

- a) 厚さ 1 mm の薄いブレードは、波状に変形し使用に耐えない。以後すべて 2.3 mm のものを使用した。
- b) ブレードが氷壁にくい込みにくいことがわかったため、2 段階の改良を行った (A→B→C: 図 19)。B の状態では、ブレードが氷壁へ食い込むものの、8-10 kg·m のトルク

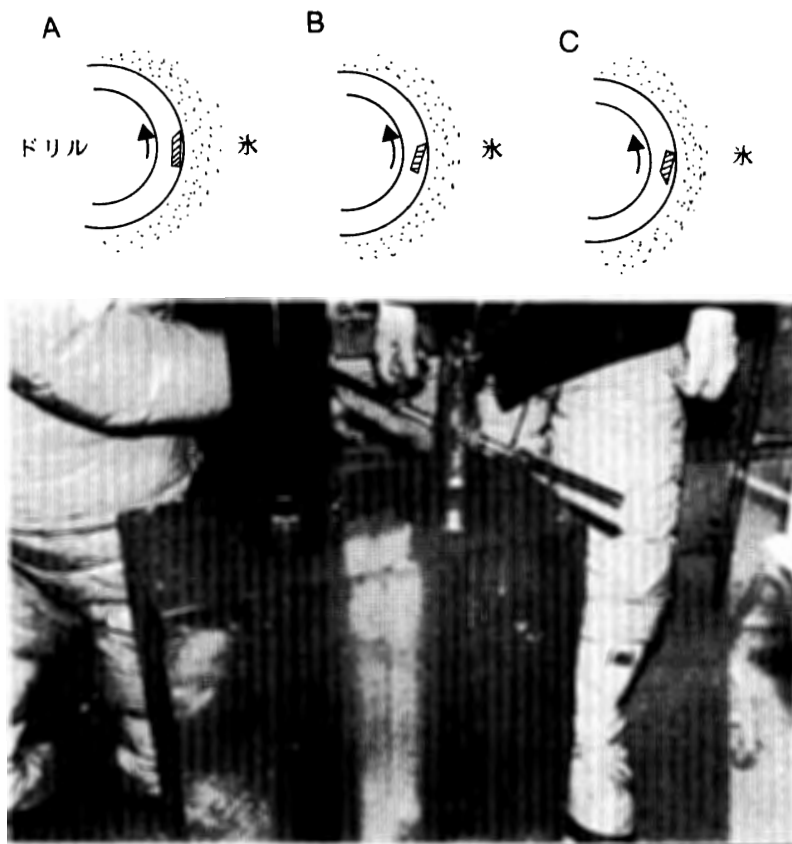


図 19 リーフスプリング型アンチトルクの孔壁への接触のさせ方.

A: 原型, B: 改良型, C: 最終改良型

Fig. 19. Contact an antitorque leaf spring to borehole surface.

A: first type, B: second type, C: final type.

クで回転してしまった。エッジが鋭く、氷を削ってしまうためである。このため、Cのように取り付け方法を変えた結果、良好な結果を得た。

c) Cの状態でのトルクは、 $30 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上であった。

d) 南極での実験においてもリーフスプリング型は一度もスリップを起こすことなく安定していた。

e) ドリル下降時に、ドリル全体がゆっくり回転を起こすことが確認された。この原因は、ブレードの孔壁との接触線に回転力を生ずるような傾きがあるためである。

2) スケート型アンチトルク装置

スケートは、長さ 400 mm 、幅 50 mm 、厚さ 5 mm で、氷への接触側を鋭くナイフエッジ状に研磨してある。ドリル周囲に 120° 間隔で3本取り付けられており、スプリングの力により最大径の変更および壁面へ押し付ける圧力の変更ができるようになっている。スケート型アンチトルク装置の実験結果は次の通りである。

a) 低温室の実験では、リーフスプリング型と同様、 $30 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上のトルクに耐えた。

b) 南極の実験では、しばしばスリップを起こし信頼性に欠けた。この原因は、孔壁が滑

らかな部分においては有効であるが、粗いところとか凸凹している部分ではブレードの接触線の長さが不足してすべり始めるためである。

3) まとめ

以上の実験結果をまとめると次のようになる。

- a) リーフスプリング型の方がスケート型より安定した性能がある。
- b) ドリル下降時、ドリル本体が回転することを防止する措置を講ずる必要がある。
- c) アンチトルク装置が効かなくてドリルが空転する事態を想定し、空転検出機能およびケーブルのねじれ防止のためのスリップリングを取り付ける必要がある。
- d) 当初スケート型アンチトルクを切削トルク比例型に設計する試みが行われた。すなわち、刃の水への食い込みが増すなどして切削トルクが大きくなると、これに比例して孔壁へブレードを押し付ける力が大きくなり、逆に刃が孔底に接触していないとき、(ウインチによる巻き上げ、巻き下ろし時)はブレードを引っ込めてしまうメカニズムである。しかし、ドリルの回転は、着底の少し前から始める必要があることから、この方式の開発を中止した。ただ、着想も良くドリル昇降時にブレードが常時孔壁をこするという状況を回避できるため、今後も検討の余地はある。

6.3. 切削実験

1) 掘削実験塔での切削実験

ここでは、1989年10月の掘削実験結果について述べる。

実験に用いたドリルはいわゆるA型、C型およびE型(チップの回収をいっさい行わないもの)の3種類である。これらはどれも第31次観測隊(夏隊)による南極での実験に用いられた。南極での実験については6.7章で述べる。なお、本実験では市販氷(60-90cm×60cm×20cm)を用いた。

図20に切削実験中に計測されたモニターデータの出力例(RUN8)を示す。この図はパーソナルコンピュータに記録されたデータをグラフ化したものである。図の刃先荷重の値は相対値である。図の領域Bのように、切削実験中の電圧、電流および回転数などがほぼ一定に推移していることは、安定した切削が行われていることを示す。

刃先荷重の調節はウインチ操作(手動)で行っている。すなわちウインチでケーブルを送り出すと刃先荷重が増し、逆にケーブルを巻き上げ気味にすると減ずる。図の領域Bの後半部分で刃先荷重が増加しているのは、オペレーターが前半よりもケーブルを送りだし気味に調節したからである。この図の実験では切削の前半より後半の方が、氷に対して刃を強く押しつけている。一般に刃先荷重の調節を手動で行いながら図のように一定値を保つことは困難である。そこで、刃先荷重の自動調節は必須の課題である。この点は、6.4章でふれる。

表7に実験結果のまとめを示す。表の各欄の意味はつぎのとおりである。

- a) 回 転 数 (rpm): 1分間当たりの刃先の回転数

切削実験(C型ドリル)

1989年10月18日

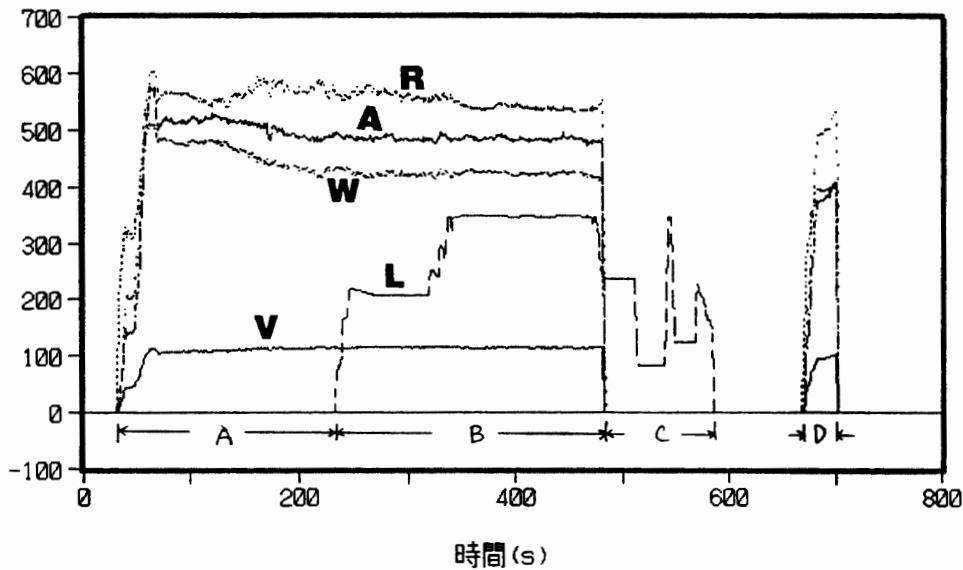


図 20 切削実験のモニター例. 電圧 (V), 電流 (A: $\times 0.01$ A), 回転数 (R: $\times 0.1$ rpm), 相対刃先荷重 (L), 電力 (W). A: 切削前の回転 (ドリル空転) 試験. B: 氷の切削. C: コアキャッチャーのためドリルを上下に動かす. D: 切削後の回転 (ドリル空転) 試験.

Fig. 20. Experimental chart of ice cutting.

- b) 掘 進 長 (cm) : 1 実験における掘削孔の深さ
- c) 電 圧 (V) : 掘削中のドリルモーターの平均入力電圧
- d) 電 流 (A) : 掘削中の平均電流
- e) 電 力 (W) : 掘削中の平均消費電力, 計算値
- f) 切 削 時 間 (s) : 実際に氷を削った時間
- g) 消費エネルギー (kJ) : 1 実験の切削に要したエネルギー (kJ), 計算値
- h) 消費エネルギー (kJ/cm) : 1 cm あたり掘削するのに要したエネルギー, 計算値
- i) 掘 進 速 度 (cm/min) : 1 分間当たりの掘削深, 計算値
- j) 切 り 込 み (A) (mm) : 1 枚当たりの刃の氷に対する切り込み厚さ (mm), 計算値
- k) 切 り 込 み (B) (mm) : 同上, コアについていた刃の削り跡から測定した値.

この表の RUN1~RUN9 の結果からわかるように, C 型ドリルはほぼ一定の切削性能を示した. また, RUN8 と RUN10 の切削実験から, ドリルの回転に要する基礎エネルギーについてもおよその値が得られた. すなわち, ドリルの回転を約 60 rpm で運転したとき, 掘進速度は約 13 cm/min である. これは, 3 枚刃のドリルでの刃の切り込みが約 0.7 mm であることを意味する. 消費電力は約 620 W である. この消費電力の内, 約 520 W は基礎エネルギーとしてドリル本体の回転摩擦やチップ回収ポンプの運転に消費されることがわ

表 7 切削実験結果
Table 7. Experimental results of ice cutting in liquid-filled hole.

RUN #	ドリル タイプ	回転数 (rpm)	掘進長 (cm)	電 圧 (V)	電 流 (A)	電 力 (W)	切削時間 (s)	消費エネ ルギー (kJ)
1	C	62	62	131	4.7	615.7	251	154.5
2	C	59	41	125	4.6	575.0	168	96.6
3	C	62	23	131	4.9	641.9	97	62.3
4	C	60	56	124	5.1	632.4	250	158.1
5	C	63	67	135	4.5	607.5	310	188.3
6	C	62	37	139	4.5	625.5	215	134.5
7	C	63	56	135	4.6	621.0	370	229.8
8	C	55	57	114	4.2	478.8	244	116.8
9	C	36	34	95	5.7	541.5	278	150.5
10	C	57	—	111	4.6	510.6	169	86.3
11	C	40	—	100	5.3	530.0	38	20.1
12	C	51	—	98	4.0	392.0	18	7.1
13	A	48	35	133	5.4	718.8	405	290.9
14	A	47	56	124	5.2	644.8	729	470.1
15	E	40	55	109	5.4	588.6	833	490.3
平均	C	62		131	4.7	617.0		

RUN #	消費エネルギー (kJ/cm)	掘進速度 (cm/min)	切り込み (A) (mm)	切り込み (B) (mm)	備 考
1	2.5	14.8	0.80	0.73	10/13/'89
2	2.4	14.6	0.83	1.13	10/13/'89
3	2.7	14.2	0.76	1.09	10/13/'89
4	2.8	13.4	0.75	0.78	10/14/'89
5	2.8	13.0	0.69	0.68	10/14/'89
6	3.6	10.3	0.56	0.57	10/14/'89
7	4.1	9.1	0.48	0.43	10/14/'89
8	2.0	14.0	0.85	0.80	10/18/'89
9	4.4	7.3	0.68	0.46	10/18/'89
10	—	—	—	—	切削前回転 (10/18/'89)
11	—	—	—	—	切削前回転 (18/18/'89)
12	—	—	—	—	切削後回転 (10/18/'89)
13	8.3	5.2	0.36	—	10/15/'89
14	8.4	4.6	0.33	0.42	10/15/'89
15	8.9	4.0	0.33	0.50	10/15/'89
平均		12.8	0.69		RUN1~RUN9 の平均

表 8 各ドリルの切削性能
Table 8. Characteristics of ice cutting by A, C and E type drills.

ドリル型	現段階での 最適回転数	消費電力 (W)	掘進速度 (cm/min)
C	60	620	13
A	50	700	5
E	40	590	4

注意) ドリルモーターはC型 600 (W), 他は 400 (W) である。

かった。したがって、氷の切削に用いられるエネルギーは約 100 W 程度である。藤井ら (1988) によると、表層メカニカルドリル実験（市販氷使用）における切削エネルギーは平均約 64 W、最大 125 W であることから、本実験における切削エネルギーは妥当な値である。

表 8 に各ドリルについて得られた切削性能を示す。ただし、数値は実験結果をまとめたものである。表からわかるように、現段階では明らかに C 型ドリルが優れているように見えるが、評価は慎重にすべきである。C 型ドリルのモーターが定格 600 (W) であるのに対し、A 型と E 型のほうは定格 400 (W) であったこと、A 型、E 型の実験が少なすぎることから、現段階でドリルの優劣（とくに掘進速度からの評価）を判定するのは困難である。また、消費電力の差はドリルの機械的構造やチップの回収機構の違いによるもので、切削性能に差があるわけではない点にも注意すべきである。実際、切削性能は刃の材質、形状と刃先荷重、回転数で決まるものであり、この点、回転数以外ほどの型も同じである。本実験結果で A 型、E 型の掘進速度が C 型より劣るのはモーター回転を上げられないことが原因である。

したがって、A 型でも E 型でもモーターの回転を 60 rpm にすれば、C 型と同様の切削性能が得られよう。そこで、現在達成されている切削性能は、

- ・ドリル回転数：60 rpm
- ・掘進速度：13 cm/min
- ・切削に要するエネルギー：100 W

であるといえる。

今後の課題としては、

- a) 掘進速度の改善
- b) 低温下での切削性能の確認
- c) 高圧下での切削性能の確認

があげられる。

まず a) に関しては、刃先荷重を増して切り込みをもっと厚くすること、あるいはモーターの回転を上げることが考えられる。いずれの場合にもより性能の高いモーターを採用する必要がある。b)、c) に関しては、実験をする必要がある。このような条件下で効率よく切削するための刃の材質や形状を決定するためには実験が不可欠である。

また、ドリルの消費エネルギーは、

$$\begin{aligned} \text{全消費エネルギー} &= \text{切削エネルギー} \\ &+ \text{機械内部の摩擦エネルギー} \\ &+ \text{液封液循環ポンプ駆動エネルギー（チップ回収）} \\ &+ \text{液かくはんエネルギー} \end{aligned}$$

である。

そこで実験によって、低温あるいは高圧といった未知の環境下での切削エネルギーに関するデータを蓄積し、消費エネルギーの観点から深層掘削機の最終設計に反映させることが大いに期待される。

2) 高圧切削実験装置

数百メートルまでの氷床掘削は大気圧の下で乾式で行われており、多くの経験的データを得ている。しかし、ドーム計画での深層液封掘削では、氷自体に $200\text{--}300\text{ kg/cm}^2$ という静水圧がかかっている、しかも掘削地点の年平均気温が -58°C (AGETA *et al.*, 1988) と低く、

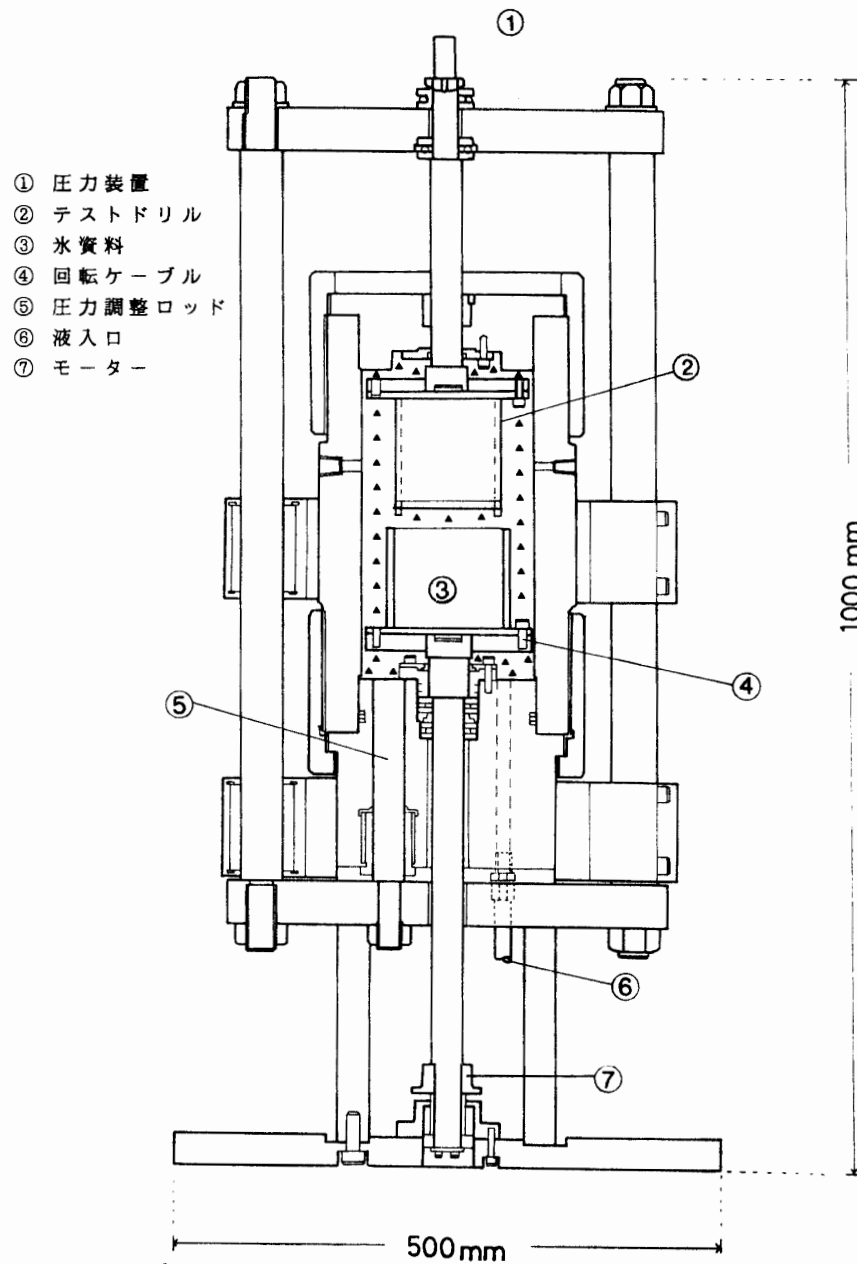


図 21 高圧切削実験装置

Fig. 21. Experimental unit for ice cutting in high pressure liquid.

深さ 2000 m でも -35°C という低い温度が予想される。このような低温域での深層メカニカル掘削は、これまでの南極のバード基地、グリーンランドの Dye-3 などでの掘削より厳しい温度条件での掘削となる。したがって、こうした掘削技術（特に切削機構）をそのまま参考にするわけにはいかない。従来の刃の材質（高速度工具鋼、タングステンカーバイト鋼など）、あるいは想定している切削トルクでは効率のよい切削ができない場合も考えられる。このため、低温・高圧下の氷の切削について、実験を重ね問題を解決する必要がある。

図 21 は高圧・低温氷の切削実験装置である。▲印で満たした部分が圧力室で、最大 350 kg/cm^2 まで圧力を加えることができ、温度を -60°C まで下げることができる。実際の切削テストはモーターに接続したロッドで氷試料を回転し、上からテストドリルを押し下げ、氷を切削することによる。この主な目的は、圧力 $0\sim 350\text{ kg/cm}^2$ 、温度 $0\sim -60^{\circ}\text{C}$ の範囲で、切削抵抗、速度を測定し、切削刃のすくい角、形状、切削厚さ、材質などを変えて最適切削条件を見出すことにある。実験は 1991 年に行う予定である。

6.4. 掘削制御実験

掘削作業の省力化と作業内容の簡便化のためには、つぎの 2 点の自動制御が必要である。

- a) 掘削制御：切削時のケーブル自動繰り出し、すなわち刃先荷重の自動制御
- b) 昇降制御：ドリル昇降の自動化、すなわちウインチの高速運転制御

まず、著しいきずやクラックのない良質なコアサンプルを得るためには、刃が氷にくい込んだりおどったりせず、一定の切り込み厚さで安定して切削しなければならない。そのためには、氷の硬さとドリルの回転数に応じた最適の刃先荷重を保ちながら切削する必要がある。ただし、6.3 章で述べたように、刃先荷重の調節を手動で行いながら安定した切削を行うことは、一般には困難な作業である。そこで、刃先荷重の自動調節が必須となる。

つぎに、深層掘削においては実際の切削時間はせいぜい 20 分程度であるのに対し、ドリルの上げ降ろしには長時間要する。この間の作業の効率化と安全性の向上を図るため、ドリルの昇降自動制御を行うことも掘削制御の分野である。しかし、これについては、まだ実現されておらず今後の課題である。

一方、掘削制御に関しては、つぎのように行う。検出された刃先荷重が前もって設定された特定の刃先荷重を超える場合は、ウインチを停止しケーブルの繰り出しをやめる。超えないときはケーブルの繰り出しを継続する。刃先荷重の検出は、ポテンシオメーターによってアンチトルク装置内のスプリングの伸縮を検出することが可能である。

図 22 にポテンシオメーターとウインチ操作を連動させた刃先荷重の制御を概念的に示した。図には表現されているが、現実の制御装置ではケーブルを巻き上げる操作はしない。すなわち、ケーブルを繰り出した結果、刃先荷重が設定値より高くなったらウインチを停止し、そのまま切削を続ける。切削に伴ってドリルが徐々に降下すれば、ケーブルを巻き上げたのと同じ効果となる。さらに切削を続け、刃先荷重が設定値より低くなった時点でケーブルを

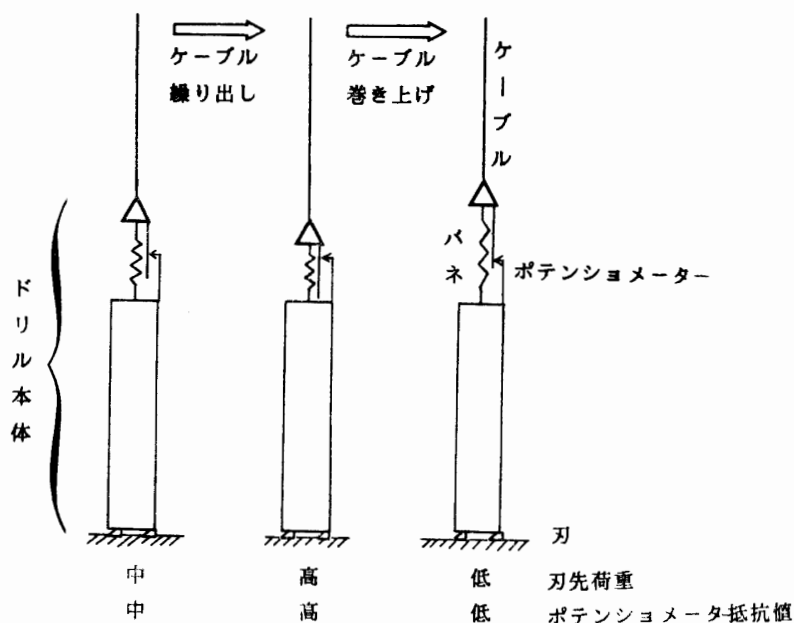


図 22 ポテンシオメータとウインチ操作を連動させた刃先荷重の制御概念図
 Fig. 22. Schematic diagram of cutter load control.

表 9 刃先荷重とポテンシオメータの抵抗値
 Table 9. Cutter load and electric resistance of a potentiometer.

刃先荷重 (kg)	ケーブル張力 (kg)	抵抗値 (Ω)	刃先荷重 + ケーブル張力 (kg)
32.5	37.5	61.0	70.0
33.0	36.5	184.0	69.5
34.2	35.5	281.7	69.7
35.3	34.5	491.7	69.8
36.0	33.5	645.0	69.5
36.8	32.5	813.3	69.3
37.7	31.5	933.3	69.2
38.5	30.5	1078.3	69.0
40.7	29.5	1098.3	70.2

繰り出す。このときのケーブル繰り出し速度は、可変となっている。速度の最適値は氷の硬さによって変わるであろうから、現場での掘削状況を見てから決定すべきと考えている。

表 9 と図 23 は、B 型ドリルを用いて行った実験である。刃先荷重とポテンシオメータの出力値は、32.5-38.5 kg の範囲で直線関係となるように検出器を調節した。そして、ウインチの on/off 条件を 35.0 kg とした。最も、この条件も氷の硬さによって変わるはずであるから、最適荷重の値も現場での掘削状況から判断し、変えられるようにしておくことが望ましい。これは今後の課題である。

このように、現在開発した掘削制御はごく単純な機構によるものである。これは、現場での状況に応じて設定条件を変えることができるよう配慮したためである。

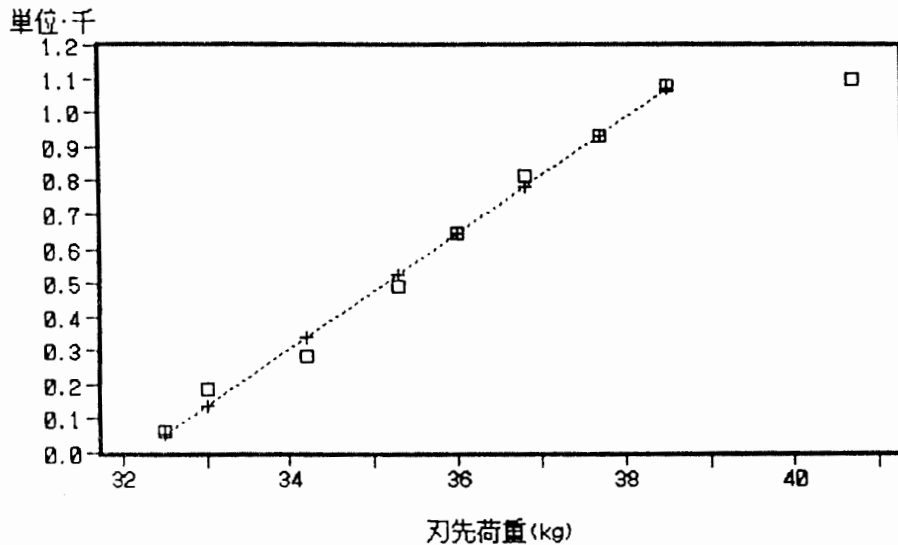


図 23 刃先荷重とポテンシオメーターの抵抗値の関係。□：実測値，＋：回帰値
Fig. 23. Relationship between cutter load and potentiometer resistance.

なお、より高度な掘削制御をめざして、1)「刃先荷重の目標値と現在荷重との偏差」および 2)「偏差の変化量」の 2 項目の評価を前件部とし、3)「ケーブル送り速度」の決定を後件部とするファジィ制御の実現可能性について、検討に入った。

6.5. ドリル昇降実験

大気中と異なり液中における物体の移動には、大きな抵抗が生ずる。特に、ボーリング孔のような狭い場所では液の移動路の確保が難しく、ドリル上昇時には負圧が、また下降時には正圧が発生するため、ドリルの昇降時にウインチに過大な負担がかかることが予想される。この抵抗の大小は、主にドリル本体の形状に左右される。そこで実験用ドリルの抵抗特性を把握し、ドリル形状や、ウインチの諸元を決定する上での基礎データにすることとした。なお、A、B 型については、外形が同一のためテストは B 型で代表した。

1) 実験方法

掘削実験塔に掘削孔と同径のパイプ（内径 $\phi 135$ mm）を垂直に取り付け、水を充満させ、ドリルの自由落下あるいは巻き上げを行い、その時のさまざまなデータを採取した。測定結果は次の通りである。

2) 測定条件

- a) 液封液：水，水温 10.6–15.5°C
- b) B 型ドリル：全長 4.5 m，重量 73 kg。チップ取り出し口のふたをつけて実験を行った。
- c) C 型ドリル：全長 4.5 m，重量 81 kg。C 型ドリルには、ドリル昇降中の液の流れを確保するため弁を取り付けた。また、チップ取り出し口のふたの有無についても実験を行った。

d) ドリルの条件設定は次の6パターンとなる。(以後、チップ取り出し口を「フタ」)

- ① B型ドリル (フタ付)
- ② C型ドリル (フタなし, 弁固定)
- ③ C型ドリル (フタなし, 弁作動)
- ④ C型ドリル (フタ付, 弁固定)

表 10 ドリルの自由落下速度

Table 10. Velocities of various types of drill falling in liquid-filled hole.

ドリル種類	落下速度 (m/min)	ドリル種類	落下速度 (m/min)
B型	36.6	C型(フタ付, 弁固定)	31.9
C型(フタなし, 弁固定)	51.4	C型(フタ付, 弁作動)	32.4
C型(フタなし, 弁作動)	51.7	C型(大気中)	計測不能

表 11 ドリルの巻き上げ実験結果

Table 11. Experimental results of winding drill up in liquid-filled hole.

巻き上げ速度 (m/min)		20	30	40	50	60
ウィンチ 電圧 (V)	1	208	208	208	208	208
	2	208	208	208	208	208
	3	208	208	208	208	208
	4	206	206	206	206	206
	5	205	205	205	205	205
	6	210	210	210	210	210
ウィンチ 電流 (A)	1	7.8	8.2	9.0	9.8	13.8
	2	7.8	8.3	8.5	9.0	12.0
	3	7.6	8.2	8.8	9.1	12.3
	4	7.9	9.4	9.8	11.5	17.9
	5	7.9	8.8	9.7	11.6	18.0
	6	8.0	8.4	8.7	8.8	10.7
ウィンチ 入力 (kW)	1	2.2	2.3	2.5	2.7	3.8
	2	2.2	2.3	2.4	2.5	3.7
	3	2.1	2.3	2.5	2.6	3.5
	4	2.2	2.6	2.7	3.2	5.0
	5	2.2	2.4	2.7	3.2	5.0
	6	2.2	2.3	2.4	2.5	2.8
ウィンチ ケーブル荷重 (kg)	1	14	30	48	84	123
	2	13	13	30	50	75
	3	8	18	30	50	83
	4	26	57	84	132	165
	5	25	53	79	124	160
	6	1	1.5	1.6	1.8	2.0

1-B型, 2-C型(フタなし, 弁固定), 3-C型(フタなし, 弁作動), 4-C型(フタ付, 弁固定), 5-C型(フタ付, 弁作動), 6-C型(大気中).

⑤ C型ドリル (フタ付, 弁作動)

⑥ C型ドリル 大気中 (比較のため大気中においても実験を行った)

- e) ドリル引き上げ: 巻き上げ速度を 20-60 m/min の間で 5 段階に変化させた.
- f) ドリル落下: ウインチのドラムクラッチを切って自由落下させたが, ドラムの軸受の回転抵抗など, 制動抵抗が働いたと思われる.

3) 測定項目

- a) 液抵抗: 液中でのドリル昇降時にケーブルにかかる全荷重から, 液中でのドリルおよびケーブル重量を差し引いた荷重を測定した.
- b) ウインチモーターの電圧・電流: ウインチモーター (3 相 200 V, 3.7 kW) の入力電圧・電流を測定し, これから消費電力 (kW) を計算した.

4) 測定結果とまとめ

この抵抗実験の条件設定は, 孔壁が鉄板であること, 液が水であることなど実際の掘削条件と異なるが, 基本的な傾向を把握し, ドリルの相対的な比較検討のためには十分であると考えられる. ドリルの液中落下実験の結果を表 10 に, 巻き上げ実験の結果を表 11 および図 24, 25 に示す. この図表から, 以下のことが明らかになった.

- a) 巻き上げ速度が 50 m/min を越えると, 液抵抗が急増する.
- b) C型ドリルは, ジャケットと孔壁の隙間が小さいため抵抗が大きいと考えていたが, B型ドリルが受けた抵抗とほぼ変わりがない.
- c) チップ取り出し口のふたによる抵抗が非常に大きかった.

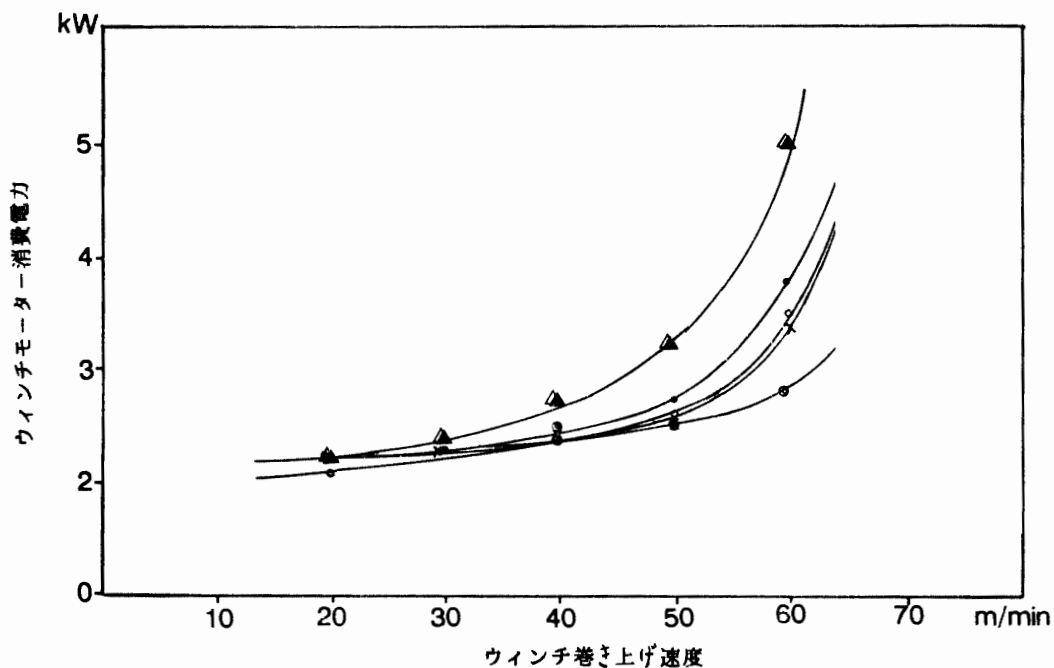


図 24 ウインチ巻き上げ速度と消費電力の関係

Fig. 24. Relationship between winch cable speed and consumption power.

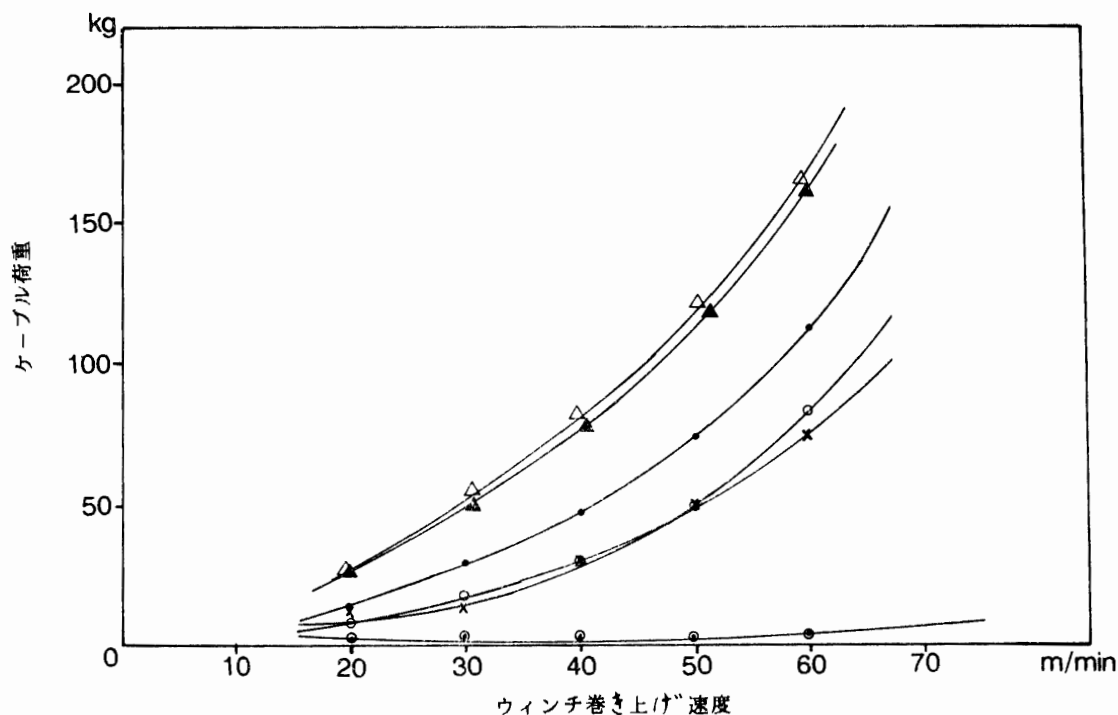


図 25 ウィンチ巻き上げ速度とケーブル荷重の関係
 Fig. 25. Relationship between winch cable speed and load.

- d) C型ドリルの真空破壊弁の効果は顕著ではない。
- e) 以上から、C型ドリルの構造上の短所と考えられていた液抵抗の大きさは、他のタイプのドリルと比べても必ずしも大きくないことが明らかになったほか、ウィンチの諸元を決める上で有効なデータが得られた。

6.6. 耐圧試験

3000 m 近い深層液封掘削のためには、約 300 kg/cm^2 の高圧に対する技術的課題の解決が必要である。このため、実際に製作した耐圧区画の耐圧特性を確認する必要がある。耐圧特性の試験は、ドリルのみならず検層機器についても同様に必要である。そのため、随時テストを行えるよう耐圧試験器を製作した。

1) 耐圧試験器の仕様

内 径: 140 mm, 有効長 2000 mm

最高使用圧力: $400 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$

加 圧 媒 体: 油圧作動油

加 圧 方 式: 手動油圧ポンプ

2) 今後の予定の実験内容

a) 耐圧容器（モーター、コンピューター室）の開発

JIS による強度計算では、耐圧容器の肉厚が厚くなりすぎて、モーター等の収容が不可能である。自前のテストによる材質と板厚の決定が必要である。

b) モーターの軸封の耐圧性能試験

モーターの軸受けは、モーター内部への液の浸透を防ぐため、液圧に耐える性能を持たねばならない。耐圧軸受けによるモーター軸の締め付け力が大きいと、モーターの回転抵抗が増し、著しいパワーロスを生ずることになる。そのため、300気圧の耐圧性能を持ち、かつ抵抗が小さい軸封を選定する必要がある。

c) 液中コネクタの試験

耐圧容器へ動力線、信号線などのケーブルを接続する必要があるが、そのための液中コネクタの選定および性能試験を行う必要がある。

d) 検層機器の耐圧試験

検層機器の開発においても全く同様の問題を抱えており、検層機器に使用される耐圧容器の性能試験等を行う予定である。

6.7. 南極実験

1) 目的・実験項目

第30次および31次観測隊の観測計画の一つとして、液封型深層掘削メカニカルドリルの掘削実験を行った。第30次観測隊では、あすかから2kmほど西側にあるシール岩と呼ばれるヌナタークの裸氷で、初年度開発のプロトタイプのドリルについて、液中での切削や



図 26 南極ジェニンクス氷河における掘削実験風景

Fig. 26. Experiment of prototype drills in the bare ice of the Jennings Glacier, Sør Ronndane Mountains, Antarctica in January 1990.

アンチトルクに関する基礎実験を東（第 30 次隊員）が行った。

また、第 31 次観測隊では、セールロンダーネ山地北側の 1 つの氷河であるジェニングス氷河中流部の裸氷域で、本山（第 31 次隊員）と東が実施した（図 26）。観測計画の概要は本山ら（1990）を参照されたし。持ち込んだドリルはパイロット孔掘削のための浅層ドリルと液封ドリルのプロトタイプ 3 機種（A, C, E 型）である。実験項目を次に示す。

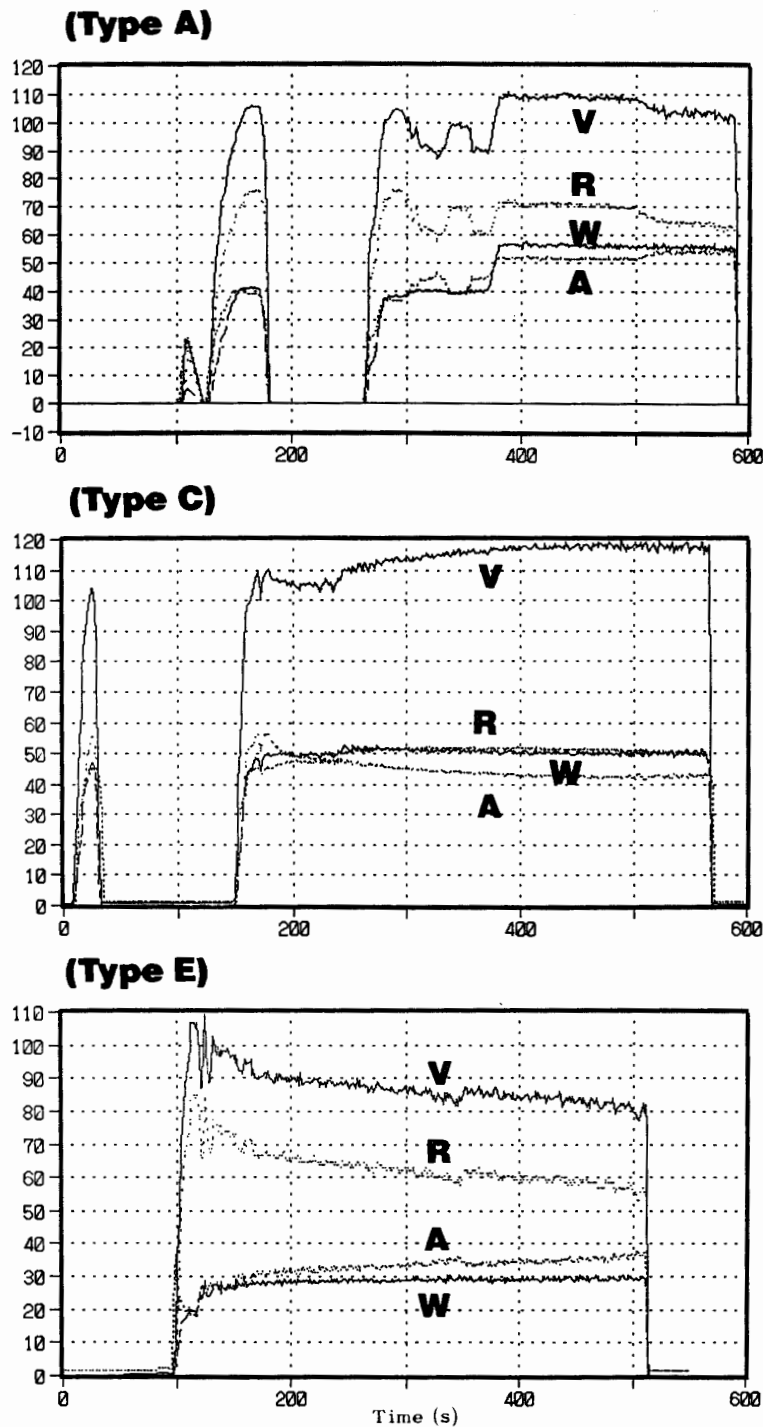


図 27 南極ジェニングス氷河における掘削実験結果。電圧(V)、電流(A: $\times 0.1$ A)、回転数(R: rpm)、電力(W: $\times 10$ W)
 Fig. 27. Results of drilling experiment in Antarctica with prototypes of A, C and E. V: voltage, A: electric current, R: rotation per minute, W: consuming energy ($\times 10$ W)

- a) ドリルのタイプ別掘削性能, 切削チップ処理性能
- b) 切削能力・掘削速度について: バレルの回転数, 刃の出(振り), すくい角, 高さとの関係
- c) アンチトルク: リーフスプリングとスケートタイプの2種
- d) ドリルモーター, ウインチの消費電力
- e) ドリルの昇降速度と消費電力
- f) 浮遊チップ回収器
- g) コアの質
- h) ドリルの操作性
- i) コアキャッチャーの調節

2) 実験結果

浅層ドリルで深さ 5.4 m まで掘削した後, これを液封ドリルのパイロット孔とし, 密度 0.95 g/cm^3 の液封液を上端 1 m まで孔内に注入した. 液封液としては Jet A1 (航空用燃料で灯油の一種) に比重調整液として高密度のパークロルエチレンを混ぜて, 比重が 0.95 になるように両者の割合を調整した.

その後, A 型, C 型, E 型の順に掘削テストを行った. 掘削実験塔を利用した掘削テストと大きく違う点は, ドリル全体が $-15 \sim -20^\circ\text{C}$ の液中に浸ったこと, および実際の氷河水で掘削したことである.

掘削実験そのものは順調であり, 浮遊チップの回収も良好に行われた. 掘削現場において, ドリルモーター入力電圧・電流, バレル回転数をモニターし, ラップトップ型パソコンでデータ収録をした. 図 27 に A, C, E 各ドリルの掘削中の電圧 (V), 電流 (A), バレル回転数 (R) と, 計算による消費エネルギー (W) を示す. A 型, C 型の最初の山はドリルを掘削孔へ降ろす前に空気中で試験的に回転したものである. 3 タイプ共に電圧と電流の変動なしに安定して掘削していることが分かる. A 型, E 型は, 掘削が進むとドリルモーターへの負荷がふえるため, 電圧がわずかに下がり電流が上昇するが, 消費エネルギーは掘削中ほぼ一定である. C 型では逆に掘削が進むにつれて, 電圧が上がり電流が下がった.

この南極実験から, 以下に示すような掘削機そのものの問題 (コアキャッチャー, アンチトルクの改良など) のほか, ドリルオペレーションに関する問題 (液封液による衣類などの濡れ, 作業場の環境など) も明らかになった. 次に改良すべき箇所を記す.

- a) コアキャッチャー: 確実性に欠ける.
- b) 減速機: 切削チップのつまりによるギヤの凍結が起こった.
- c) 切削チップ除去の簡便化

いずれも掘削の基本能力には根本的には関わりない部分であるが, 3 年目にはこうした部分の改良を行う.

7. ま と め

ドーム計画での深層掘削は、昭和基地から約 1000 km 離れた標高 3800 m の高所で、かつ年平均気温が -58°C (AGETA *et al.*, 1989) という極寒の地で行われる。そのために、輸送、設営、掘削操作など多くの点で、軽量型で省力化された深層掘削システムの開発が必要となった。

氷床深層掘削はこれまで幾つかの国々の手で行われているが、その中で最も軽量なものとして、1981 年グリーンランド Dye-3 で 2037.6 m 深まで掘削したデンマークの ISTUK 型ドリルがある (GUNDESTRUP *et al.*, 1984)。このシステムは 1968 年米国が南極バード基地で 2164 m 深の掘削に成功したシステム (UEDA and GARFIELD, 1969) に比べ約 1/10 にまで重量的に軽減されている。しかしながら、ISTUK 型ドリル本体の全長は 11.5 m (1 回の掘削で 2.2 m のコアを採取可能)、重量 180 kg であった。特に、ドリル長はドリルタワー高や掘削作業場の規模、掘削作業の容易さなどに大きくかかわってくるので、掘削能率のみを考えてドリルシステムを設計するわけにはいかない。

本開発研究では、これまでの実験研究の結果から、ドーム計画で使用される氷床深層液封型掘削システムとして以下の仕様を考えている。

- 1) 掘削機：エレクトロメカニカル型 (A 型、または C 型)、採取コア長 2.0-2.5 m、コア径 10 cm、重量約 150 kg、駆動モーター 600-750 W (DC)、掘進速度 20 cm/min 以上、ドリル長は A 型で 10 m、C 型で 8 m である。
- 2) アンチトルク：リーフスプリング方式。
- 3) ウインチ：アーマードケーブル 3000 m 巻、巻き上げ速度平均 2500 m/h、重量約 1 t、モーター 7.5 kW。
- 4) ドリルタワー：起倒式、高さ約 10 m。
- 5) ウインチコントローラー：巻き上げ、巻き下げ速度最大 3600 m/h、微速度制御および自動巻き上げ・巻き下げ機構を備える。
- 6) ドリルコントローラー：掘削速度の自動制御および掘削状況 (速度、切削トルク、温度、圧力など) の情報、監視機構を備える。
- 7) 発電機：16 kVA ディーゼル。

これらの仕様は、ISTUK 型ドリルに比べ軽量化、そして省力化されたものとなった。特に、切削チップの処理は ISTUK 型のシリンダー吸引型とは異なり、吸引ポンプを取り付け強制的にしたため効率よいチップ輸送・回収が可能となった。その結果、C 型ドリルでは、ISTUK 型ドリルに比べ同じコア長でもドリル全長を約 30% も短くすることが可能となった。

しかし、これまでの 2 年間の開発研究は、ドーム計画の掘削に対してすべての課題を解決したわけではない。本報告の開発研究結果は、プロトタイプのドリルによる成果なので、実寸型のドリルによるテストが必要である。さらに、前述したように、掘削予定地点では低温

域の高圧氷を掘削しなければならないため、アンチトルク、コアキャッチャー機構、切削刃および接地圧の最適設定による切削効率の向上など、低温・高圧下のもとで再検討しなければならない課題も残っている。同時に、実際の掘削作業は少人数で行われるため、ウインチ操作の簡便化、掘削の自動化をさらにおし進めることが必要であろう。

実寸型のドリルは1990年に製作される。本機は1988年に設置された氷床掘削実験塔で実験をくり返した後、1991年と1992年には北極圏（あるいは他の地域での氷河）での氷床掘削システム全体のテストを行い、開発を完了する予定である。

謝 辞

氷床深層ドリルの開発に当たっては多くの人からさまざまな助言と協力を得てきた。北海道大学名誉教授の鈴木義男先生には、これまでのメカニカルドリル開発の豊富な経験から、貴重な助言をいただいた。オリンピア工業(株)社長の宮原英輔氏には、実験場所の提供などさまざまな便宜を計っていただいた。また、次の方々には、ドリル製作段階において多大なる協力をいただいた。オリンピア工業(株)長根重敏氏、九州オリンピア工業(株)社長の宮原盛義氏、(株)オリンピア技研の津布子泰夫氏、加藤茂雄氏、八島エンジニアリング社長の八島茂久氏、(株)高丘製作所技術開発センターインテリジェントモーター開発プロジェクトの諸氏、(株)丸八ポンプ製作所名古屋支店の三原邦彦氏、吉田友彦氏、日本バルブコントロールズ(株)社長の船見昭夫氏。ここに合わせて感謝する次第です。

文 献

- AD HOC PANEL ON POLAR ICE CORING (1986): Recommendations for a U.S. Ice Coring Program. Washington, National Academy Press, 67 p.
- AGETA, Y., KAMIYAMA, K., OKUHIRA, F. and FUJII, Y. (1989): Geomorphological and glaciological aspects around the highest dome in Queen Maud Land, East Antarctica. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **2**, 88-96.
- 藤井理行・田中洋一・成田英器・宮原盛厚・高橋昭好 (1988): 雪氷表層メカニカルドリルの切削特性。南極資料, **32**, 286-301.
- GUNDESTRUP, N. S., JOHNSEN, S. J. and REEH, N. (1984): ISTUK—A deep ice core drill system. CRREL, Spec. Rep., **SR 84-34**, 7-19.
- HIGASHI, A., NAKAWO, M., NARITA, H., FUJII, Y., NISHIO, O. and WATANABE, O. (1988): Preliminary results of analyses of 700 m ice cores retrieved at Mizuho Station, Antarctica. Ann. Glaciol., **10**, 52-56.
- 本山秀明・東 信彦・DECLAIR, H., HUYBRECHTS, P. (1990): セールロンダーネ山地地域雪氷調査隊報告 1989-1990 (JARE-31)。南極資料, **34**, 225-234.
- 日本雪氷学会極地雪氷分科会 (1988): 東南極内陸ドーム雪氷研究計画, 17 p.
- REEH, N. (1984): Antitorque leaf springs. CRREL, Spec. Rep., **SR 84-34**, 69-72.
- RUFLI, H., STAUFFER, B. and OESCHGER, H. (1976): Light weight 50-meter core drill for firm and ice. Ice Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER *et al.* Lincoln, Univ. Nebraska Press, 139-153.
- 鈴木義男 (1978): エレクトロ・メカニカルドリルの新アンチ・トルク方式。低温科学, 物理編, **37**, 163-166.
- SUZUKI, Y. and SHIMBORI, K. (1986): Development of an ice core drill for liquid-filled holes. Mem. Natl Inst Polar Res., Spec. Issue, **45**, 86-92.
- UEDA, H. T. and GARFIELD, D. E. (1969): Core drilling through the Antarctic Ice Sheet. CRREL, Tech. Rep., **231**, 17 p.

(1990年8月28日受付; 1990年9月25日改訂稿受理)