

改良型氷床深層掘削ドリルの総合実験報告
—2002年北海道陸別町での実験—

亀田貴雄¹・藤井理行²・高橋昭好³・田中洋一⁴・成田英器⁵・新堀邦夫⁵・
東 信彦⁶・古川晶雄²・吉本隆安⁷・宮原盛厚³・五十嵐誠²・河野美香²・
的場澄人²・戸山陽子⁸・佐藤和秀⁹・高橋修平¹・渡邊興亞²

Experimental results on improved JARE deep ice core drill
—Experiments in Rikubetsu, Hokkaido in 2002—

Takao Kameda¹, Yoshiyuki Fujii², Akiyoshi Takahashi³, Yoichi Tanaka⁴, Hideki Narita⁵,
Kunio Shinbori⁵, Nobuhiko Azuma⁶, Teruo Furukawa², Takayasu Yoshimoto⁷,
Morihiro Miyahara³, Makoto Igarashi², Mika Kohno², Sumito Matoba²,
Yoko Toyama⁸, Kazuhide Satow⁹, Shuhei Takahashi¹ and Okitsugu Watanabe²

Abstract: Deep ice coring to bedrock (3028 m in depth) at Dome Fuji Station is planned during three successive summer seasons starting from 2003/2004. An improved JARE deep ice core drill (12.2 m in length and 3.8 m in maximum core length) was developed in December 2001 for the ice coring at Dome Fuji. In January/February of 2002, we performed experiments on drill performance using artificial ice blocks in Rikubetsu, Hokkaido. In this paper, we outline the experiment and report the results. It was found through the experiment that an ice core of 3.8 m length was smoothly obtained by the improved drill with three screws in the chip chamber and cutting pitch of 5 mm/cycle. About 45000 small holes 1.2 mm in diameter were made on the surface of the chip chamber. These small holes enabled liquid to circulate between cutters and outside of the drill through the chip chamber in the drill. The dry density of the chips was 440 to 500 kg/m³ and the chip recovery rate during ice coring was 65 to 91%. A check valve installed at the bottom of the chip chamber to prevent outflow of chips from the drill was not tested enough, but more durability is needed for the valve. The newly developed motor system and core catchers of the drill worked

¹ 北見工業大学. Kitami Institute of Technology, 165, Koencho, Kitami 090-8507.

² 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

³ (株)地球工学研究所. Geo Tecs Co. Ltd., Tokan Mansion 705, 15-14, Kanayama 1-chome, Naka-ku, Nagoya 460-0022.

⁴ (株)ジオシステムズ. Geosystems Inc., Nanyodo Bldg., 14-4, Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033.

⁵ 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 060-0819.

⁶ 長岡技術科学大学. Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomiokacho, Nagaoka 940-2188.

⁷ 九州オリンピック工業(株). Kyushu Olympia Co. Ltd., Kunitomi-cho, Higashi Morokatagun, Miyazaki 880-1196.

⁸ 千葉大学. Chiba University, 1-chome, Yayoicho, Inage-ku, Chiba 263-8522.

⁹ 長岡工業高等専門学校. Nagaoka National College of Technology, 888 Katagaicho, Nagaoka 940-8532.

perfectly. The average coring speed was 24.5 cm/min with cutting pitch of 5 mm/cycle. The average power consumption during ice coring was 171 W.

要旨: 2003/2004年からは、第二期ドームふじ観測計画として、3028 mの氷床底部までの深層掘削が予定されている。この計画のために、我々は新たに改良型氷床深層掘削ドリル（全長 12.2 m、最大採取コア長 3.8 m）を開発し、2002年1月末から2月にかけて北海道陸別町において総合掘削実験を実施した。本論文ではこの実験の概要と結果を述べる。実験の結果、3つのスクリー（直径 112 mm、長さ 100 mm）をチップ室につけ、切削刃のピッチを 5 mm に調整すると、安定した掘削能力があることがわかった。また、チップ室側面に多数の孔（直径 1.2 mm、総数約 45000）を開けることで掘削中の液流循環が確保され、3.8 m 長のコアを掘削することに役だった。チップの乾き密度は 440–500 kg/m³ であり、掘削時のチップ回収率は 65–91% であった。切削終了後に液中でバレルを空転させる時間が長い場合や切削ピッチが 2 の場合は、チップ回収率が高くなる傾向にあった。チップ逆流防止弁は、十分な実験ができなかったが、今後さらに高耐久仕様にすることが望まれる。新たに開発した駆動ユニットやコアキャッチャーも正常に動作した。平均掘削速度（刃先をピッチ 5 mm にした場合）は 24.5 cm/min、掘削中の平均消費電力は、171 W であった。

1. はじめに

南極氷床での深層掘削のため、1988年から国立極地研究所を中心として氷床深層掘削ドリルの開発が続けられてきた（藤井ら、1990; Tanaka *et al.*, 1994; 成田ら、1995; 高橋ら、1996）。こうした研究開発を基に製作された掘削ドリルを用いて、1995年から96年にかけて、ドームふじ観測拠点にて、2503 m 深までの掘削に成功し（Dome-F Deep Ice Coring Group, 1999; 藤井ら、1999）、採取した氷コアの解析により過去 32 万年間の気候環境変動が明らかにされた（例えば、Watanabe *et al.*, 1999; Hondoh *et al.*, 1999; Fujii *et al.*, 1999 など）。一方、アイスレーダー観測によるとドームふじ観測拠点の氷厚は 3028 m であり（藤田秀二、私信）、氷床底部までの残り 523 m の掘削により過去 80 万年以上に遡るコアを採取することができる（藤井、2002）。

そこで、この氷床底部までの氷を採取し、過去 80 万年以上に遡る地球規模の気候環境変動を明らかにする事を目的とする「第二期ドームふじ観測計画」が立案された。ここでは、2003/4年から2005/6年の3夏季で3028 m 深の氷床底部まで掘削することが計画されたため、従来よりも掘削速度が速く、信頼性の高い深層掘削システムの開発が必要となった。

掘削速度を上げるためには、一回の掘削で得るコア長を長くすること、掘削孔中でのドリルの上げ下げ速度を早くすることが重要である（例えば、Suzuki and Shiraishi, 1982; 高橋 1996 など）。また、信頼性が高く、耐久性のある掘削システムを開発するためには、第一期ドームふじ観測計画で使用された氷床掘削ドリル（以下、「第一期氷床掘削ドリル」と略す）の種々の問題点（藤井ら、1999）を改良する必要がある。これらの点を考慮し、改良型氷床深層掘削ドリルの開発を進め（Takahashi *et al.*, 2002）、2001年12月には製作が完了した。この改良型掘削ドリル（全長 12.2 m、最大採取コア長 3.8 m）の掘削諸性能を確認するため、

2002年1月末から2月初めにかけて、北海道陸別町で総合掘削実験を実施した。

実験の目的は、以下の点を明らかにする事である。

- 1) 改良型ドリルでは、コアバレルを従来の2.2mから4m(有効内寸3.84m)に延長したが、この新しいドリルで3.8m長のコアが採取可能か。
- 2) コア長が長くなることに伴い切削チップ(以下、チップと略す)が多く排出されるが、このチップを効果的にチップ室まで輸送するための最適なポンプシステムを明らかにする。
- 3) 長さ5.5mのチップ室で3.8mコア掘削時のチップが収納可能かなど、ドリル内部へのチップ収納状況を明らかにする。
- 4) チップ室を構成するパイプに45000個の小孔(直径1.2mm)を開けた。これによりチップ室から外へ抜け出る液のフィルター面積は飛躍的に増大した。この効果を確認する。
- 5) 第一期深層掘削では掘削中にドリルへ収納したチップが掘削孔へ再流出したため、チップ回収作業が増え、掘削作業効率の低下を招いた。この防止策として、改良型ドリルでは新たにチップ逆流防止弁をコアバレルの頂部につけた。この効果を確認する。
- 6) ドリルの駆動ユニット(モーターと減速器)は従来の直流ブラシレス型から永久磁石式直流モーターに変更した。この新型モーターの性能評価と通信システムに対する影響を確認する。
- 7) 新型コアキャッチャーの性能を確認する。
- 8) 採取した氷コアの質(クラック等が入っていないか)を調べる。

本報告では、上記の目的のために実施した実験の概要と結果を述べる。

2. 実験日程および参加者

掘削実験は、陸別町町民運動場(住所:北海道足寄郡陸別町原野基線335番地)にて、2002年1月27日から2月4日まで行われた。1月27日から30日までは、掘削ドリルやウインチシステムなどの実験機材の設置等の準備を行い、31日から2月2日まで掘削実験を行った。表1に掘削実験の担当者それぞれの担当をまとめた。2月1日(土)は、公開実験として、実験を一般の方々や報道機関に公開した。実験期間中多くの人が見学に来たが、外国からはレフ・サバチュージン博士(Dr. Lev M. Savatyugin, ロシア北極南極研究所)、李院生教授(Prof. Li Yuansheng, 中国極地研究所)、孫波教授(Prof. Sun Bo, 中国極地研究所)、が参加した。

3. 実験装置および方法

3.1. 掘削実験塔

本実験のために、高さ34.4m、幅12.8mの掘削実験塔を新たに設置した。図1にこの実験棟の立面図および平面図を示す。これは、架設足場からできており、上部の荷重を支えるた

表 1 深層掘削実験担当者

Table 1. List of participants in the drill test at Rikubetsu in 2002.

氏名(所属)	担当
藤井理行(国立極地研究所)	総括責任者
亀田貴雄(北見工業大学)	実験主任
高橋昭好((株)地球工学研究所)	掘削ドリルおよび実験用マスト担当
田中洋一((株)ジオシステムズ)	掘削通信担当
東 信彦(長岡技術科学大学)	実験担当
新堀邦夫(北大低温科学研究所)	〃
吉本隆安(九州オリンピック工業(株))	〃
宮原盛厚((株)地球工学研究所)	〃
高橋修平(北見工業大学)	〃
榎本浩之(〃)	〃
佐藤和秀(長岡工業高等専門学校)	〃
古川晶雄(国立極地研究所)	〃
五十嵐誠(〃)	〃
的場澄人(〃)	〃
藤田耕史(名古屋大学大学院)	〃
小島真輔(北見工業大学大学院生)	〃
成田英器(北大低温科学研究所)	実験および記録担当
河野美香(国立極地研究所)	〃
戸山陽子(千葉大学大学院生)	〃
菊地規哲(しばれ技術開発研究所)	実験支援(実験準備全般)
石橋 勉(〃)	実験支援(〃)
浜田 始(〃)	実験支援(製氷担当)
小島靖典(〃)	実験支援(掘削ドリルの吊り上げ法の検討および製作担当)
板東孝巳(〃)	実験支援(10 m パイプの準備および製作担当)

め、3段構造とした。掘削ドリルは、塔前面のドリル起倒用支え台に置き、支え台に載せたまま垂直に起立させた後、塔の上部までウインチで引き上げた。その後、塔の最上部に設置したスライド式滑車により掘削ポイント上に移動した。また、途中にスライドアームを取り付け、上記のスライド滑車によるドリルの移動をスムーズなものにした。図2に引き上げ途中の掘削ドリル、図3に氷柱の前で鉛直に立てられた掘削ドリルを示す。

3.2. 製氷および氷柱

陸別農協の低温倉庫内で、長さ0.9m×幅0.9m×高さ1.5mの鉄製箱の中に徐々に水を入れ、製氷した。掘削実験ではこれを9箱製作し、3箱ずつ積み上げ、高さ4.5mの氷柱を3本製作した。氷柱の上面には、パイプ接続用のアダプターを5個埋め込んだ。これらのアダプターに長さ5mの塩ビパイプ(型式SGR-NAパイプVU、内径160mm、外径165mm)をそ

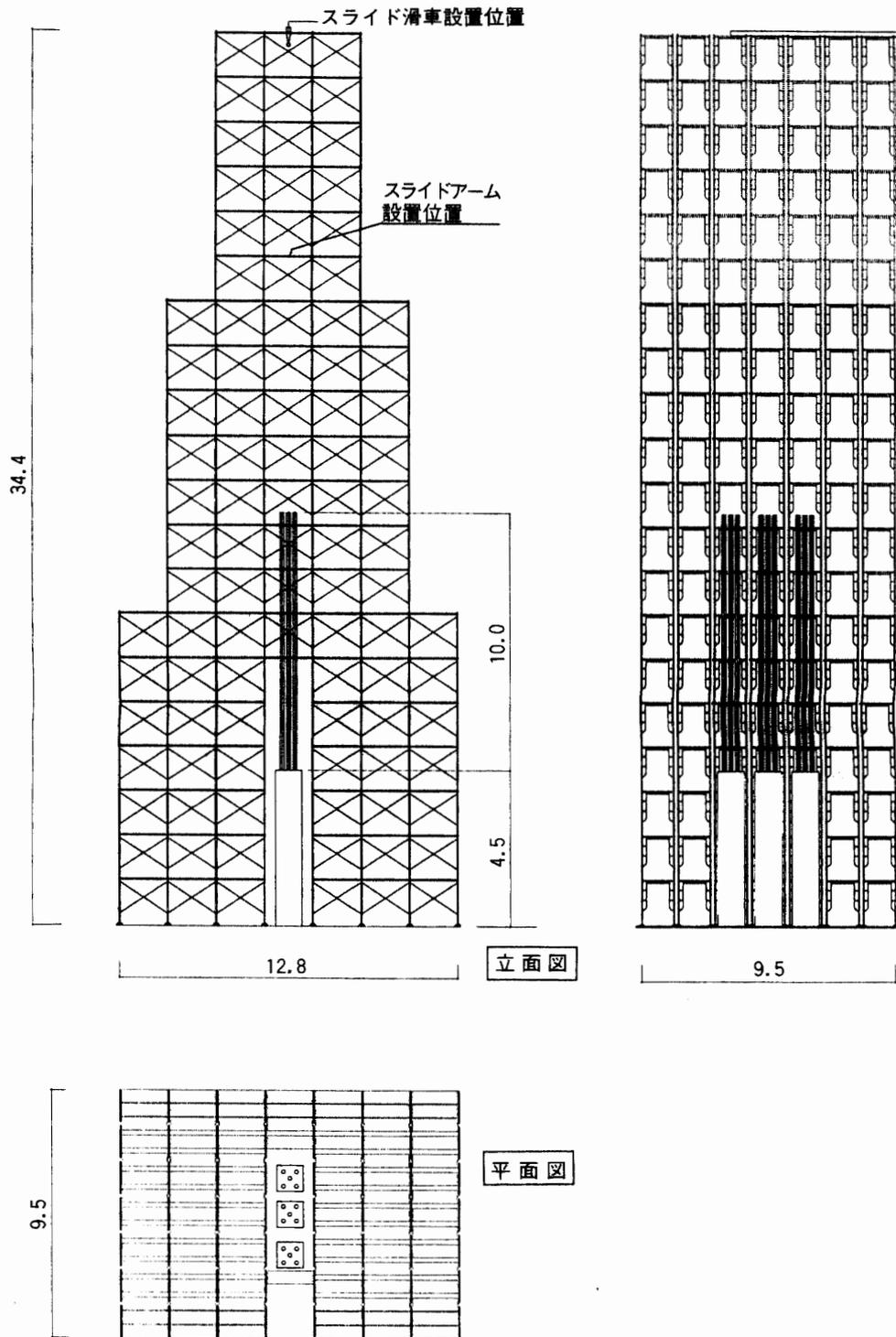


図1 掘削実験棟の概要 (立面図および平面図)
 Fig. 1. Diagram of the ice-drill testing tower in Rikubetsu town.

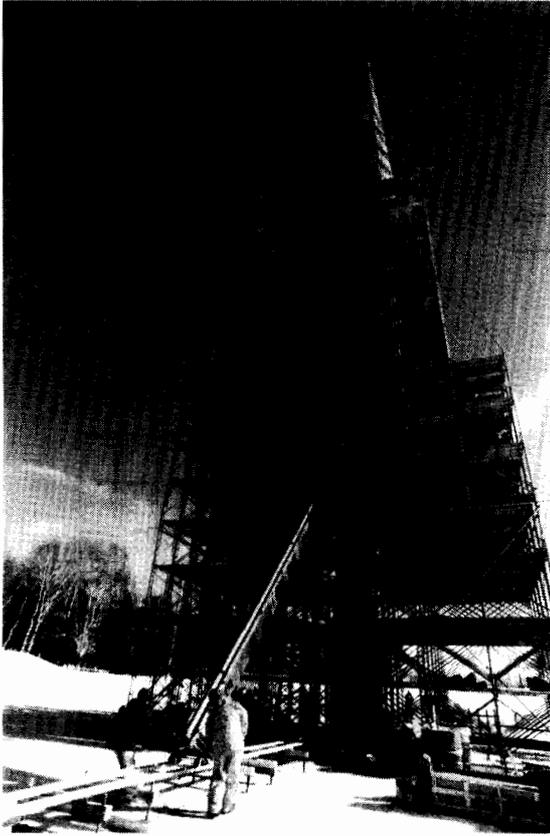


図2 掘削実験の状況（ウインチでドリルを引き上げている途中）

Fig. 2. Scene of ice-drill testing (drill is moving up on a sliding table).

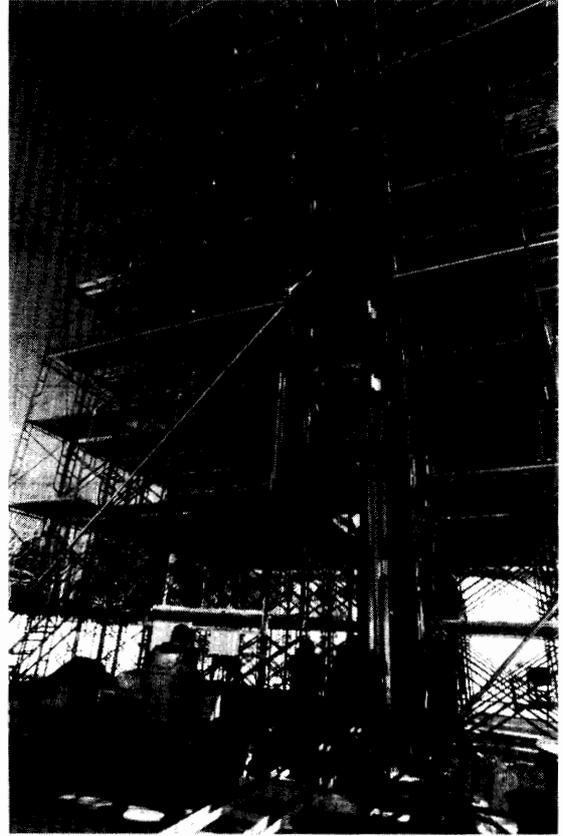


図3 掘削実験の様子（ドリルが氷柱の前で垂直に立てられる）

Fig. 3. Scene of ice-drill testing (drill is raised at a right angle in front of the ice pillar).

それぞれ2本つなぎ、10mパイプ5本を氷柱の上に立てた。3本の氷柱では、10mパイプを合計15本立て（図1参照）、4m掘削を15回可能とした。しかし、氷柱とパイプ部の接続部アダプターや10mパイプの鉛直性の問題から、実際には8本のパイプのみが実験に使用可能であった。なお、掘削前には、パイプ内に液封液をポンプで注入した。掘削実験塔および氷柱の準備は、陸別町しばれ技術開発研究所が担当した。

3.3. 液封液

液封液は、灯油（密度 820 kg/m^3 ）と代替フロン（密度 1550 kg/m^3 ）（(株)旭硝子製アサヒクリン、AK225）を200Lドラム缶内で混合し、氷と同等の密度（ $910\text{--}920 \text{ kg/m}^3$ 程度）に調整したものを使用した（密度は、比重計を使い液の表面付近で測定）。なお、2液は、ドラム缶内で単管パイプを使い、約20-30秒程度攪拌して混合した。ただし、掘削終了後に得たチップから採取した液封液の密度は、氷の密度より高い $940\text{--}950 \text{ kg/m}^3$ を示した。これは、2液の混合が不十分であったことに起因すると考えられる。従って、実験で使用した液封液の

平均密度は $940\text{--}950\text{ kg/m}^3$ と考えられ、氷密度よりも 3-4% 大きくなった。一方、第 36 次南極地域観測隊によるドームふじ観測拠点での深層掘削での液封液（酢酸ブチル）の密度は $940\text{--}950\text{ kg/m}^3$ であったという報告もあり（田中洋一，私信），液封液密度が氷よりも最大で 4% 大きかったことは本掘削実験における掘削性能評価に本質的な影響を及ぼさないと考えられる。

3.4. チップの乾き密度およびチップ回収率

チップの乾き密度 (ρ_d) は、濡れチップ（切削切粉であるチップと液封液の混合物を意味する）の重量 (A)，濡れチップの含水率（重量%）(B)，濡れチップの体積 (C) を用いて、以下の式で求めた。

$$\rho_d = AB/C.$$

濡れチップの重量はドリルの先端部にプラスチックコンテナ（内側が網箱となっている 2 重箱）を置き、ドリルから排出されるすべての濡れチップを内側の網箱に回収し、これを台ばかり（最大 50 kg，最小目盛り 0.2 kg）で測定した。濡れチップの含水率また、濡れチップの重量を測定した直後に 150 g 程度を網箱から濡れチップを採取した。これを融解して含水率（体積%）を求め、これに水の密度 1000 kg/m^3 と液封液の密度（平均値 945 kg/m^3 ）を用いて換算した。濡れチップの体積は、網箱での濡れチップに平均の高さを測定し、網箱の断面積をかけて求めた。一方、シャフトを引き抜く際にそのままシャフトに付いているコア状のチップ（以下、チップコアと略す）の重量，含水率（体積%），体積を測定し、同様な方法でチップコアの乾き密度も算出した。

また、回収したチップの重量と掘削時のチップ生産量との比をチップ回収率とした。ここで、チップ生産量は、実測のコア長，コア径を用いて、掘削孔の直径を 135 mm として計算した。

4. 実験条件および結果

掘削実験は、条件を変え 8 回行った。それらの実験条件および結果を表 2 にまとめる。実験は主として、1) チップ室内でのスクリーアの直径および長さ，2) 切削ピッチ，を変えて行った。1) では種々の直径，長さのスクリーアをコアバレル上部のシャフトの取り付け，チップの取り込み・運搬・収納などを比較し，評価することを目的とした。図 4 に本実験でシャフトに取り付けた 4 種類のスクリーアを模式的に示す。2) では切削ピッチの変更に伴う，掘削速度，チップ粒径，チップ処理など掘削状況の変化を明らかにすることを目的とした。

日本が開発した氷床深層掘削ドリル（「JARE 型ドリル」ともいう）は，コアバレルの外側に巻きつけたスパイラルを液の中で回転させることにより，液を輸送するいわゆる「アルキ

表2 実験条件および結果一覧

Table 2. Experimental conditions and results.

RunNo.		1	2	3	4	5	6	7	8
刃×シュー		30×P5	30×P5	30×P5	30×P5	30×P5	30×P2	30×P5	30×P2
ブースターおよびスクリー組合せ*		B112	B112+S105 (シャフト全長)	B112+S70 (シャフト全長)	B112	B112+S112 (2個) (間隔1.7m)	B112+S112 (2個) (間隔1.7m)	B112+S112 (2個) (間隔1.7m)	B112+S112 (2個) (間隔1.7m)、ただし S112は穴あき仕様
コア長 (cm)		297	177	275	384	384	325	384	285
切削時間 (min, sec)		11'18"	6'32"	11'05"	22'44"	15'30"	33'34"	15'06"	29'29"
電圧 (V)	Ave.	176.4	162.1	168.4	164.3	166.9	164.1	166.7	160.8
	Max.	180.9	166.5	178.1	177.7	174.0	170.9	178.1	165.4
電流 (A)	Ave.	0.83	0.97	1.23	1.56	0.89	0.93	0.99	0.85
	Max.**	1.3	2.2	3.4	3.7	2.3	4.2	1.9	3.8
平均消費電力 (ドリルモーター) (W)		146	157	207	256	149	153	165	137
バレル回転数 (rpm)	Ave.	75.3	68.8	70.9	68.7	71.8	71.3	70.3	70.0
	Max.	77.8	70.9	75.1	74.6	75.7	74.8	74.5	72.7
接地圧 (%)	Ave.	21.5	14.5	14.1	24.1	13.4	29.1	13.9	34.6
	Max.	27.0	24.1	18.6	72.8	48.6	55.4	37.8	46.5
	Min.	14.8	4.7	6.5	10.2	3.6	10.7	8.8	3.6
平均掘削速度 (cm/min)		26.3	27.1	24.8	16.9	24.8	9.7	25.4	9.7
コア径 (mm)		93.5	93.7~94.2	93.5	93.5	93.4	94.0	93.6	93.6
ピッチ (mm/cycle)		3.5	3.5	3.5	3.2~3.5	3.3~3.7	1.4	3.8	1.4~1.6
チップ径 (mm)		1~1.5	1~1.5	1~1.5	1~1.5	1~1.5	0.5~1.5	1.0~3.0	0.5~1.5

* B112とは、径112 mm、長さ100 mm、巻数1のブースターを意味する。ブースターとは、コアバレルとシャフトとの接合部につけられたスクリーを意味する。

Sはスクリーを意味する。径112 mm、105 mm、90 mm、70 mmの四種類がある。S112、S105、S70と記する。

** 電流4 Aでドリルモーターに自動停止回路が働き、電流を遮断して、ドリルが停止するようになっているが、実験6では瞬間的に4 A以上の電流が流れた。

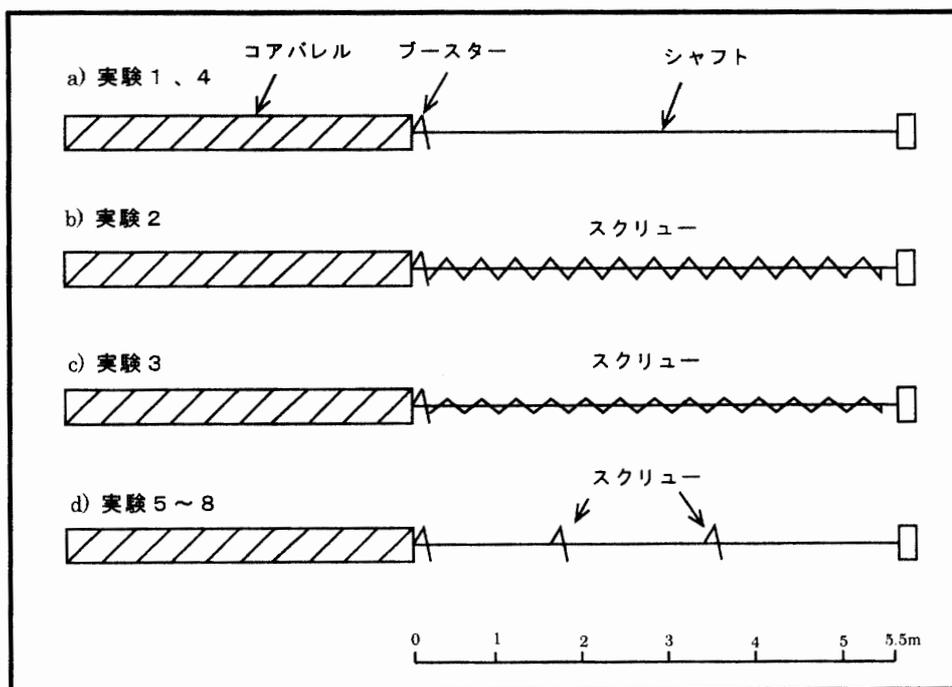


図4 チップ室内での種々のスクリューおよびブースターの配置（模式図）

a) ブースター（直径 112 mm，長さ 100 mm，1 巻）のみの場合，b) シャフト全長に直径 105 mm のスクリューを取り付けた場合，c) シャフト全長の直径 70 mm のスクリューを取り付けた場合，d) シャフトに 1.7 m 間隔で，直径 112 mm，長さ 100 mm のスクリューを 3 つ取り付けた場合

Fig. 4. Configuration of screw and booster in chip chamber.

a) a booster, b) a booster with a 105 mm diameter screw (5.5 m in length), c) a booster with a 70 mm diameter screw (5.5 m in length), d) a booster with three screws (diameter 112 mm and length 100 mm).

メディアポンプ」をチップ輸送の基本としており，コアバレル直上にあるスパイラルをブースター，シャフトに取り付けるスパイラルをスクリューと呼ぶ。以下に，条件を変えて行った 8 回の実験での掘削の様子を記述する。なお，掘削刃の回転速度はドリルへの供給電圧値（モーター電圧）を手動で調整し，ドリルの接地圧はウインチの上げ下げにより手動で調整した。図 5 に掘削実験塔の作業台での様子を示す。この写真ではドリル上部 1.5 m 程度が 10 m パイプの先端から出ているが，棒でドリル上部を固定し，ドリル本体の回転を防止した。従って，今回の実験では掘削中のアンチトルク試験はできていない。

4.1. 各掘削実験の状況

1) 実験 1

チップ輸送能力が最も弱い場合の実験である。ドリルのシャフトとコアバレルとの接合部にブースター（径 112 mm，長さ 100 mm，巻数 1 の螺旋状のもの）を取り付けた実験で，第



図5 掘削塔での作業状況（棒でドリル上部を固定）

Fig. 5. Scene during ice drill testing (a shaft was used at the upper part of the drill for ant-torque purpose).

一期氷床深層掘削ドリルと同じ仕様である。掘削は安定しており、平均 26.3 cm/min で掘削が進んだ。297 cm まで掘り進んだ時に、液封液が試験氷から漏れだしたので、掘削を停止した。液封液が漏れなければさらに掘削可能であった。チップは、ブースターの上 200 cm から 550 cm（上端）まで充填していた（350 cm 長）。掘削中の平均モーター電圧は 176.4 V 、平均モーター電流は 0.83 A 、ドリルモーターでの平均消費電力は、 146 W であった。

2) 実験 2

チップ輸送能力が最も強い場合の実験である。チップ室内でのチップ輸送力を増すために、ドリルのシャフト全体に径 105 mm のスクリューを取り付けた。掘削は安定していたが、電流値が若干高かった。177 cm まで掘削した時に電流値が上昇し、掘削を停止せざるを得なかった。チップは、下部に 130 cm 長、上部に 120 cm 長に 2 分割していた。上部のチップは硬く圧密されていた。このためシャフトの回転抵抗が大きくなり、電流値が上昇したと思われる。掘削中の平均モーター電圧は 162.1 V 、平均モーター電流は 0.97 A 、平均消費電力は、 157 W であった。

3) 実験 3

チップ輸送能力が中程度の場合の実験である。スクリューは、実験 2 と同様に全長タイプ

としたが、チップ輸送力を弱めるために径 70 mm とした。掘削は安定していた。この実験でも、実験 2 と同様に電流値が高くなった。260 cm まで掘削した時、再び電流値が上昇したので、掘削を停止した。チップは、3 分割されて出てきた（長さは、60 cm, 35 cm, 208 cm）。上部のチップは圧密されていた。掘削中の平均モーター電圧は 168.4 V、平均モーター電流は 1.23 A、平均消費電力は、207 W であった。

4) 実験 4

チップ室内のスクリー組み合わせを実験 1 と同様に戻した（ブースターのみ）。掘削は、1.1 A にて継続した。その後、ウインチを on, off しつつ、ドリルモーターが停止するまで掘削を継続し、「コアの掘りすぎ」を模擬実験した。コア長は 384 cm（コアバレルの有効長）であった。その結果、シャフト上部にチップが過充填され、ドリル本体からシャフトが抜けなくなった。手巻きウインチでバレルを抜こうとしたが無理であった。このため、バーナーでドリルを暖めて、ようやく 1 時間後に手巻きウインチでシャフトが引き抜けた。チップは非常に硬くなっていた（ドライバーがやっと刺さる程度）。チップ逆流防止弁はブースターが圧密されたチップの圧力で下がったために破損した。チップは、ブースターの上 223 cm から 550 cm（上端）まで充填していた。掘削中の平均モーター電圧は 164.3 V、平均モーター電流は 1.51 A、平均消費電力は、256 W であった。

5) 実験 5

バレルの引き出しを容易にするため、チップ室内でチップを分割して貯蔵するように径 112 mm、長さ 10 cm のスクリー（巻数 1）を 1.7 m 間隔でシャフトに 3 個つけた。掘削は安定しており、コアバレル一杯の 3.84 m のコアが得られた。チップは 3 分割されていた（長さは、130 cm, 137 cm, 130 cm）。チップもあまり硬くならず、掘削ドリルからシャフトをスムーズに抜くことができた。掘削中の平均モーター電圧は 166.9 V、平均モーター電流は 0.89 A、平均消費電力は、149 W であった。

6) 実験 6

スクリーは実験 5 と同様である。刃先をピッチ 2 mm のシューに交換した。これは、第一期ドーム計画での刃先ピッチに近い条件である（実験 1 から 5 までは、ピッチ 5 mm であった）。刃の切り込み量が小さくなり、バレルの回転速度をこれまで通りの 70 rpm としたため、掘削速度は平均 9.7 cm/min と遅くなった。また、325 cm まで掘り進んだ時に、電流値が 3 A を超えたので、掘削を中止した。チップは、圧密されており、シャフトを引き抜くのが非常に困難であった。このため、実験 4 と同様にバーナーでドリルを暖めて、引き抜いた。チップは 3 分割されていた（長さは、135 cm, 122 cm, 135 cm）。掘削中の平均モーター電圧は 164.1 V、平均モーター電流は 0.93 A、平均消費電力は、153 W であった。

7) 実験 7

公開実験。これまでの実験の中で刃先のピッチとスクリーの最もよい組み合わせ（実験

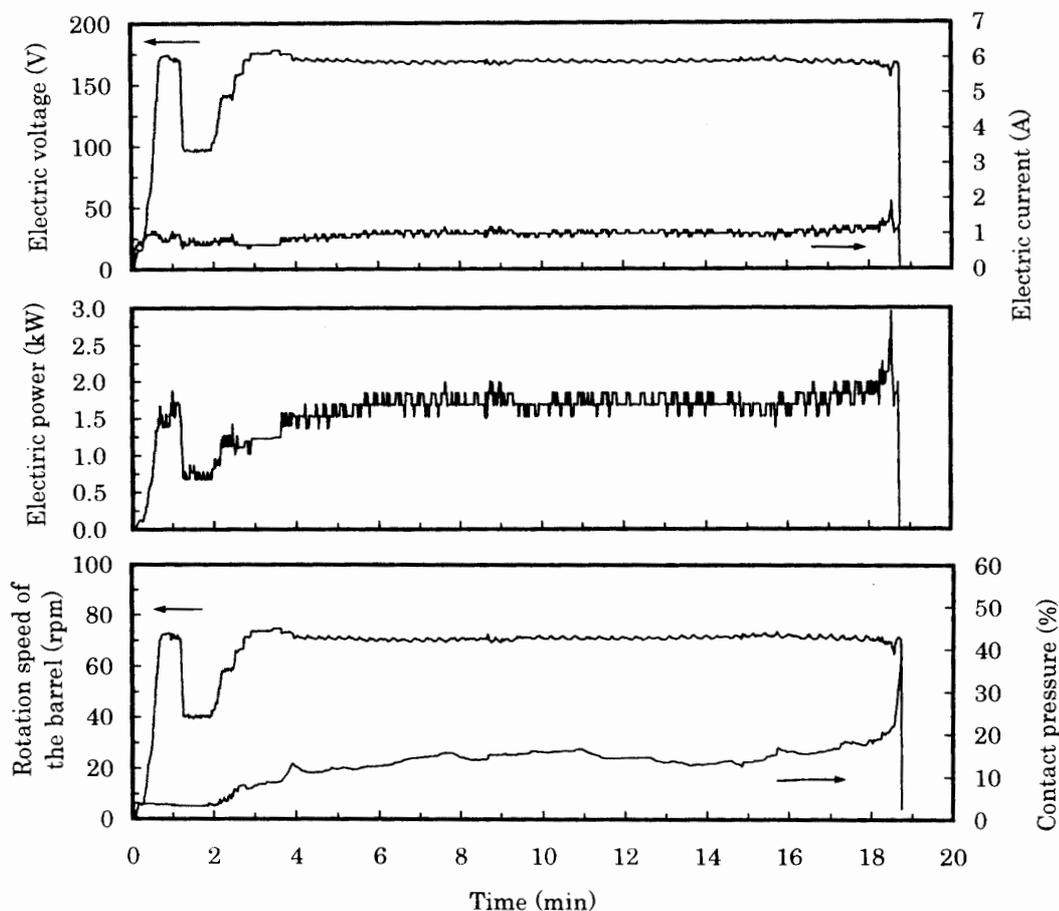


図6 掘削中のモーター電圧，モーター電流，バレル回転数，消費電力，接地圧の変化の例（実験7の例）

Fig. 6. Variation of motor current (A), motor voltage (V), electric power ($W=VA$) and rotation of the barrel (rpm) during Experiment No. 7.

5: ピッチ 5 mm, 3つのスクリューを離してつける)で掘削した。掘削は安定しており、掘削後にバレルをスムーズに抜くことができた。コア長は、384 cmであった。チップは3分割されていた（長さは、170 cm, 135 cm, 129 cm）。実験中のモーター電圧 (V), モーター電流 (A), バレル回転数 (rpm), 消費電力 (W), 接地圧 (%) を図6に示す。掘削中は、電流値を手動で調整しているため、電流値や電力値に振動が見られる。この時は、掘削の最後に電流値が 1.9 A まで上昇したため、ドリルを停止した。正味の掘削時間は、15'06"であった。掘削速度は、25.4 cm/min であった。掘削中の平均モーター電圧は 166.7 V, 平均モーター電流は 0.99 A, 平均消費電力は、165 W であった。

8) 実験 8

刃先を再びピッチ 2 mm として、上部の二つのスクリューを穴あき仕様（直径 10 mm の孔を多数）に変更した。穴あきスクリューは、チップ室内でのチップの上方への輸送力を若干

弱める働きがあって、チップの過大な圧密が回避できることが期待された。掘削ピッチ 2 mm のために、掘削速度も平均 9.7 cm/min と遅くなった。また、285 cm まで掘り進んだ時に、電流値が 3 A を超えたので、掘削を中止した。チップは 3 分割されていた（長さは、122 cm, 120 cm, 140 cm）。チップは、ある程度圧密されていたが、シャフトは軽く抜けた。掘削中の平均モーター電圧は 160.8 V、平均モーター電流は 0.85 A、平均消費電力は、137 W であった。

5. 実験結果の評価

5.1. チップ輸送

実験では、シャフトとコアバレルとの接合部のブースターに加えて、4 種類のスクリューをシャフトに取り付けたポンプシステムによってチップの輸送状況を調べた。チップの取り込み、輸送の点ではいずれのポンプシステムも十分な能力を発揮した。

しかし、使用するスクリューによって、採取できるコア長が変化した。ブースター 1 個のみの場合（実験 4）やスクリューを 3 個取りつけた場合（実験 5, 7）では、コアバレル一杯の 3.84 m まで掘削可能であった（実験 6, 8 ではスクリュー 3 個を取り付けたが、刃先をピッチ 2 mm としたため、後述の理由により、3.84 m まで掘削できなかった）。径 70 mm のスクリューをシャフト全体に取り付けた場合では（実験 3）、コア長 2.60 m でモーター電流が上昇し、掘削継続が不可能であった。一方、径 105 mm のスクリューをシャフト全体に取り付けた場合では（実験 2）、コア長 1.77 m で電流上昇し、掘削不可能となった。

シャフトに取り付けるスクリューは、それ自身が回転することにより、チップを上昇させる「ポンプ」の役割がある。これまでの実験により、日本が開発した JARE 型ドリルのポンプシステムは、流量が大きいものの圧力が低いことがわかっていた（Takahashi *et al.*, 2002）。今回は、その圧力差を補うためにチップ室にあるシャフト全長にスクリューを巻き付け、チップを輸送する実験をした（実験 2 および 3）。チップ輸送力の観点からは、1) 実験 4-8, 2) 実験 3, 3) 実験 2 の順に輸送力が強くなっていく。

得られたコア長を比較すると、ポンプ能力が低い場合（実験 4, 5, 7）は、採取したコア長が長く、ポンプ能力が高い場合（実験 2, 3）は、コア長が短くなった。この原因は、チップ室のチップの詰まり方の違いに起因する。すなわち、シャフト全長にスクリューをつけた場合は、チップの搬送力が大きく、早期にチップがチップ室の上端に送られたために圧密された。この高密度チップのためにシャフトおよびスクリューの回転が妨げられ、ドリルモーターの電流値が上昇し、掘削停止に至り、コア長が短くなったと考えられる。そこでチップ室内にあるスクリューの輸送力をさらに低くすればチップの圧密が避けられ、長いコアを採ることにつながる、というアイデアが生まれた。それが実験 8 である。実験 8 では、径 112 mm、長さ 100 mm のスクリュー（巻数 1）に直径 10 mm の穴を多数あけたものを上部に 2 つ使用

した。実験 8 では掘削途中で電流値が上昇し掘削を停止したため、穴開きスクリーンの効果を正しく評価することはできなかった。結局、今回の実験では、10 cm の長さのスクリーン 3 個を 1.7 m 間隔で離して取り付け、チップ搬送力を弱めた場合が掘削に対して最良な条件であることがわかった。

5.2. コア長、切削時間、掘削ピッチとの関係

1) コア長と切削時間

ピッチ 5 mm のシューを使用した時には、コアバレル一杯まで掘削可能であったが（実験 4, 5, 7）、ピッチ 2 mm のシューを使用したとき（実験 6, 8）ではコアバレル一杯になる前に電流値が上昇し、ドリルを停止したためにコア長が短くなった。特に、実験 6 では、スクリーンの条件が実験 7, 8 と同じであるがこの現象が生じた。この結果は、切削時間が関わっていると思われる。ピッチ 5 mm（実験 5, 7）の場合は 15-16 分でコアバレル一杯である 3.84 m の掘削を終わっている（実験 4 は、掘削終了後にドリルを回転させていたので、検討対象から除外する）。一方、ピッチ 2 mm（実験 6, 8）の場合は 29-33 分程度となっていた。この様に長時間の掘削をすると、シャフトに取り付けたスクリーンによってチップが圧密され、電流増加につながったと思われる。

2) コア長と切削ピッチ

1) で述べたようにピッチが小さい場合はコア長も短かった。この現象は掘削時のチップ粒径の大きさの違いにも原因があると思われる。ピッチ 5 mm で掘削した時のチップ粒径は 1-3 mm 程度であり、ピッチ 2 mm の場合は粒径 0.5-1.5 mm であったが、特に粒径 0.5-1.0 mm のものが主であった（ただし、コア表面で実測された切削ピッチは、5 mm シューの場合 3.2-3.8 mm、2 mm シューの場合 1.4-1.6 mm であった。なお、これはシューの高さに問題がある）。

切削刃で生じたチップは、刃からチップ室方向へ流れる液流に取り込まれる。これは、コアバレルのスパイラルによるアルキメディアンポンプ、シャフトに取り付けたブラスターおよびスクリーンにより、切削刃→チップ室→フィルター（シャフト頂部にある金網とチップ室側面にあけた約 45000 個の直径 1.2 mm の小孔）→ドリルと孔壁の隙間→切削刃、の経路で循環する。チップ室に入った液は、貯蔵されたチップの間を通るが、チップ粒径が小さいと、チップ間の隙間も小さく、ここを液が通り抜ける際の通過抵抗が大きくなる。この抵抗増加によって、全体の液循環が弱くなり、チップの吸い込みも不十分になり、ついには掘削を停止しなければならなくなる。チップ処理ポンプの圧力が弱い JARE 型ドリルでは掘削時のチップ粒径を大きくすることが重要である。

5.3. 新型チップ室

実験で使用した改良型ドリルは、チップ室のフィルター面積において第一期深層掘削ドリルと大きな違いがある。第一期氷床深層掘削ドリルではその面積は、 70 cm^2 であったのに対し、改良型ドリルでは 580 cm^2 であった。陸別実験において、実験1, 4では第一期深層掘削ドリルと同じポンプとしたので、変更点はフィルター面積のみである。第一期ドームふじ深層掘削で得られた平均コア長を比較すると、36次隊では 1.59 m 、37次隊では 1.79 m であった（藤井ら, 1999）。今回の陸別実験では、ピッチ 5 mm のシューを使うと毎回 3.84 m のコアバレル一杯のコアが掘削可能であった。これまで、1回の掘削長を伸ばすために、1) 掘削ドリルのポンプ能力を高めること、2) フィルター面積を増やし、液抵抗を減らすこと、の2点を特に検討してきた。今回の実験の結果、スクリーを多数用いてポンプ能力を高める方法は、チップを過大に圧密するという弊害があることがわかった。従って、JARE型ドリルにおいては、フィルター面積の増大が長いコアを得るために有効であることがわかった。

5.4. チップ収納

1) チップ室内でのチップの状況

図7に掘削終了後にドリルからコアバレルを引き出した際に、シャフトについていた「チップコア」位置および長さをまとめた。これはシャフトを引き抜く時に若干圧密され、掘削終了直後の形状を示していない可能性はあるが、参考までにまとめた。図8にドリルから引き抜かれた直後のチップコアの様子を示す。また、チップコアの合計長さ（ 5.5 m 長）との比を表3にまとめた。

2) チップの乾き密度

チップの乾き密度およびチップコアの乾き密度を図9および表3にまとめた（表3ではチップの乾き密度の計算過程も示した）。チップの乾き密度は $440\text{--}500\text{ kg/m}^3$ であり、7回の実験の平均値は、 470 kg/m^3 であった。一方、チップコアは、実験5と実験7で測定し、それぞれ 560 kg/m^3 と 500 kg/m^3 であり、平均は 530 kg/m^3 であった。チップコアの乾き密度は、チップの乾き密度よりも高く、同一直径の氷球の最密充填密度（ 550 kg/m^3 ）に近い値となった。

3) チップ回収率

チップ回収率を図10および表3にまとめた。チップ回収率は $65\text{--}91\%$ であり、平均では 80% であった。ピッチ5での実験の場合、切削終了後の液中でのバレルの空転時間が2秒以上になると、チップ回収率が平均よりも高かった（実験3および4）。これは、切削終了後のバレル空転による液の流れによって、液中を浮遊しているチップが捕捉されたことを示す。また、切削ピッチが2の場合にもチップ回収率が平均よりも高かった（実験6および8）。ピッチ5での切削に比べるとピッチ2での切削は単位時間あたりのチップ生成量が少なく、

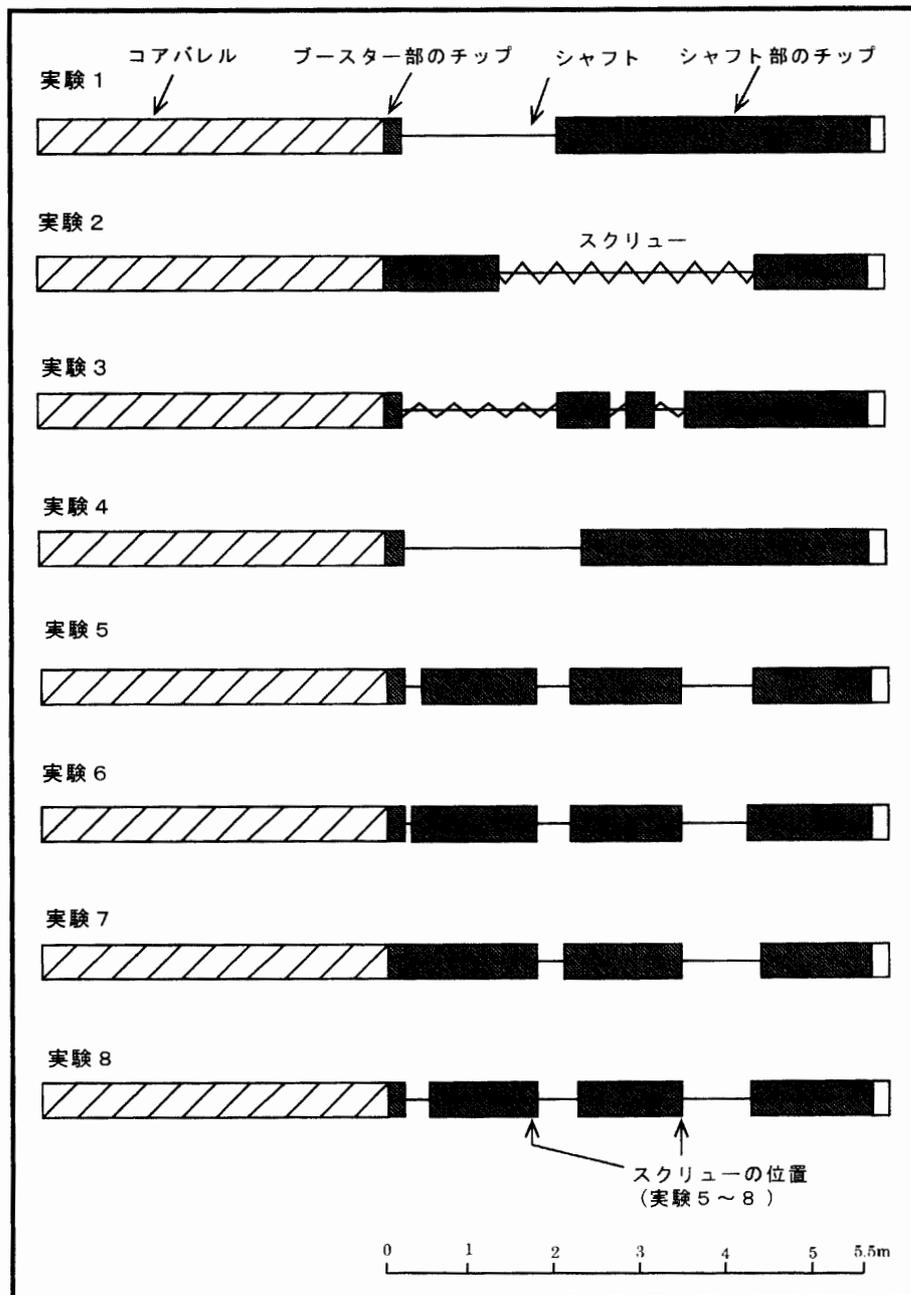


図7 バレル、シャフトとともに引き出されたチップの長さ、位置の状況
 Fig. 7. The length and location of chips when the barrel and shaft were removed from the drill.

切削時の液中でのチップ濃度がやすい。そのために、チップ輸送には有利となって回収率が高くなったと考えられる。

なお、掘削機から濡れチップを回収する際には、若干の濡れチップが掘削機やバレル、ドリル保持台などに若干付着しており、これらは未回収となった。これらの未回収の濡れチップを考慮すると、実際の平均チップ回収率は、80%よりもやや高い値になると推定される。



図8 ドリルから引き抜かれたチップコアの様子
Fig. 8. “Chip core” from the drill.

4) チップ室の容積の妥当性

表3にそれぞれの実験で得たチップコアの合計長およびチップ室（長さ 5.5 m）との割合（%）をまとめた（コアバレルの有効寸法 384 cm まで掘削をした実験 4, 5, 7 に対して記載）。これらのチップコアの合計はそれぞれ 328–434 cm であり、チップ室の長さの 60–79% を占めた。従って、改良型深層掘削ドリルのチップ室の容積は、最大で 21% の余裕があり、チップ室の長さ 5.5 m は妥当な設計であったと考えられる。

5.5. チップ逆流防止弁

チップの逆流防止弁は、掘削ドリルを引き上げる際にチップがドリルから漏れることを防ぐ効果があり、掘削孔内の残留チップ量を減らす。これは、チップ回収機の動作回数を減らし、全体の掘削速度上昇に貢献する。改良型ドリルでは、掘削終了時にドリルモーターを逆転させることにより、チップ室最下部で隙間を塞ぐ機能を持った「チップ逆流防止弁」を開発し、これを採用している。今回の実験では、実験 4 終了後に破損したので正確な評価は出来ないが、実験 1–3 では弁は正常に動作しており、チップの流出防止に有効であったと考えられる。ただし、逆流防止弁の機構の強度を今後増す必要がある。

5.6. ブラシ付き直流モーターおよびそのノイズ対策

第一期水床深層掘削ドリルでは直流ブラシレス型のモーターを使用した。複雑な電子制御が必要であったこと、回転速度が 12000 rpm と高速回転型であったので減速ギアの消耗が

表3 チップの乾き密度, チップ回収率およびチップ室内でのチップコアの割合

Table 3. Dry chip density, percentage of chip recovery during ice coring and ratio of chip core to chip chamber.

実験番号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
濡れチップ ¹⁾ の重量(kg):A	25.5	12.3	21.5	29.9	27.3	29.4	29.1	23.5	-
濡れチップの含水率(体積%)	-	61.9	68.5	78.5	75	60.9	64.7	70.5	68.6
濡れチップの含水率(重量%):B ²⁾	-	63.2	69.7	79.5	76.1	62.3	66	71.6	69.8
チップの重量(kg):C=A x B	-	7.8	15.0	23.8	20.8	18.3	19.2	16.8	-
濡れチップの体積(m ³):D	0.038	0.016	0.033	0.049	0.046	0.040	0.040	0.038	
チップの乾き密度(kg/m ³):E=C/D	-	500	460	490	460	460	480	440	470
チップコアの乾き密度(kg/m ³)	-	-	-	-	562	-	499	-	531
チップの生産量(kg):F ³⁾	20.3	12.0	17.8	26.2	26.2	22.0	26.2	19.4	-
チップ回収率(%):G=C/F	-	65	84	91	79	83	73	87	80
切削終了後の液中でのパレル空転時間(秒)	5	0	2	6	1	0	0	0	
チップコアの長さ(m) ⁴⁾ :H	-	-	-	3.28	3.97	-	4.34	-	
チップ室(5.5m長)との割合(% ⁴⁾):H/5.5x100	-	-	-	60	72	-	79	-	70

1)チップと液封液の混合物を意味する。

2)水の密度1000kg/m³、液封液の平均密度945kg/m³を用いて、体積%から重量%に変換。

3)実測のコア長、コア径を用い、掘削孔の直径を135mmとして計算。

4)384cm切削時のみ計算。

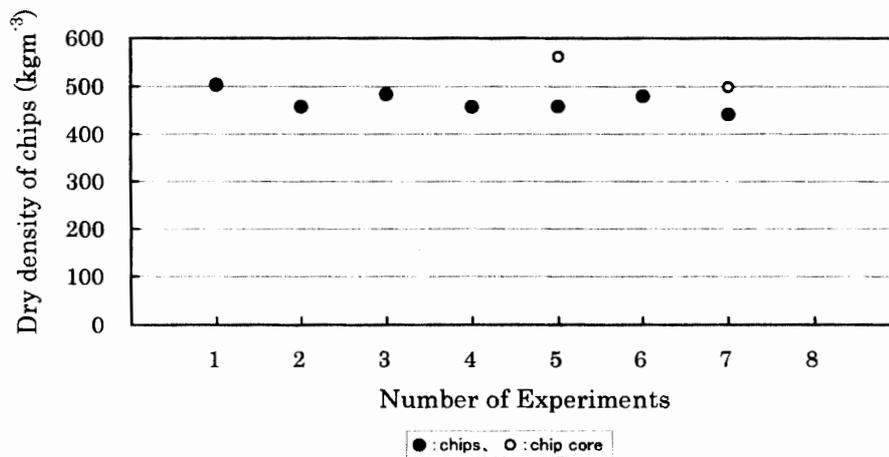


図9 チップおよびチップコアの乾き密度
Fig. 9. Dry density of chips and "chip core".

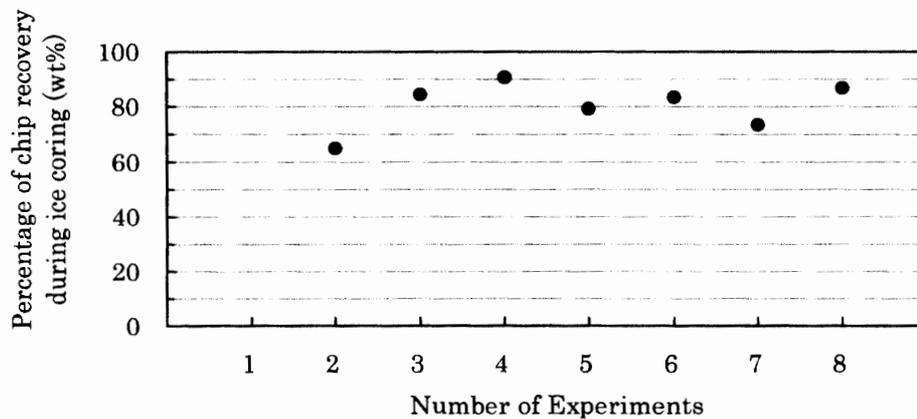


図10 チップ回収率
Fig. 10. Chip recovery rate during ice coring.

激しいという欠点があった。改良型ドリルでは、永久磁石式直流モーターを特別に設計し、製作した (Takahashi *et al.*, 2002)。このモーターを採用した利点は以下の通りである。

- 1) 回転数が 4000 rpm であるため、減速ギアも従来の三段減速に比べ一段減速ですむ。
- 2) 減速器の入力回転数が低くなり、減速機自体の長寿命化も期待できる。
- 3) 永久磁石型であるため、従来型に較べて制御回路が飛躍的に簡単になった。
- 4) 従来型では困難であった逆転操作が簡単に出来る。

今回の実験の結果、掘削中のドリルモーターでの平均消費電力は 137-256 W であった。これは、第 1 期氷床深層掘削ドリル (コアバレル 2.2 m, 消費電力約 400 W) と比べると、改良型ドリルはコアバレル長が 1.8 倍になったにもかかわらず、消費電力が 1/2-1/3 であった。これは、ドリル全体の機械動作効率が良くなった事として評価できる。また、モーターブラシから発生する火花が通信コンピュータに作用し、掘削データにノイズを与えるのではない

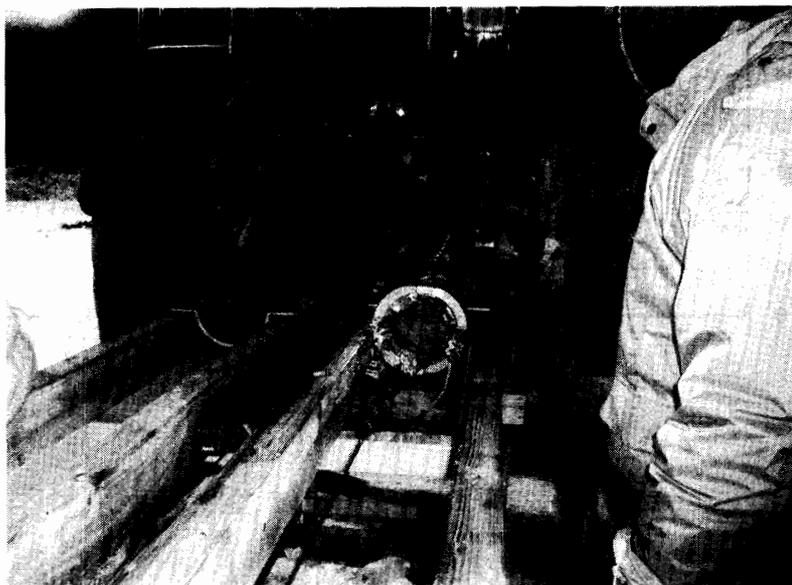


図 11 手巻きウインチを使ってドリルからコアバレルを引き抜く。
Fig. 11. The core barrel was removed from the drill by hand winch.

かと当初心配されたが、これも記録した掘削データにはノイズもなく、現状のノイズ対策が有効であることがわかった。

5.7. 「掘りすぎ」による地上作業時間の増加

実験 4, 6 では、モーター電流値が 3.0 A になるまで掘削を継続し、故意に「掘りすぎ」の状態にした。この実験では、チップがチップ室内で過充填したため、手動ではコアバレルはまったく抜けなくなった。結局、バーナーでドリルを暖め、固結したチップを融解してから手巻きウインチでコアバレルを引き出した(図 11)。この作業に 30 分程度かかった。また、いったん暖まったドリル本体を冷やすのに、さらに 1 時間程度かかった。つまり、モーター電流が 3.0 A を超えて掘削を継続し、コアバレルの中でチップが詰まると、1.5 時間程度、地上作業時間が増加することがわかった。

5.8. コアキャッチャー

8 回の掘削実験では全てコアを取りこぼすことなく採取できた。これは、今回の改良型掘削ドリルでは、従来の深層掘削ドリルのコアキャッチャーに比べて、形状やバネ強さが改良され (Takahashi *et al.*, 2002), それが適切に動作しているためだと思われる。

5.9. コアの質

8 回の掘削実験では、177 cm から 384 cm のコアが採取できた。また、コアの表面には、切

削刃の削り跡のみが観察され、氷内部につながるクラック等は存在せず、質の良いコアを採取することができた。

6. ま と め

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 新たに開発した全長 12.2 m の改良型掘削ドリルは、コアバレル一杯の 3.84 m コアを順調に掘削できることが確認された。8回の掘削実験の平均モーター電圧は 166 V、平均モーター電流は 1.03 A、平均消費電力は 171 W であった。これは、従来の第 1 期氷床深層掘削ドリルの消費電力（約 400 W）と比較すると、1/2-1/3 であった。また、刃先をピッチ 5 mm のシューにした時の平均掘削速度は、24.5 cm/min であった。
- 2) 掘削が最も順調に進んだ時のスクリューの組み合わせは、径 112 mm、長さ 100 mm のスクリュー（巻数 1）を 1.7 m 間隔でシャフトに 3 個つけた時であった。この場合はチップの過充填が防げ、コアバレルも容易に引き抜けた。
- 3) 30 分を超えるような長時間掘削を行うと、チップ室上部でチップが圧密され、シャフトの回転抵抗を増加させることがわかった。短時間で掘削を終了するためには大きいピッチで掘削することが有効である。
- 4) ピッチ 5 mm のシューで掘削すると順調に掘削できたが、ピッチ 2 mm のシューにすると途中で掘削停止となった。これは、チップ室内で液が受ける抵抗がチップ粒径に依存しているためと思われる。改良型ドリルでは、チップ粒径を大きくすることが重要である。
- 5) 改良型ドリルでは、チップ室側面に 45000 個の小孔（直径 1.2 mm）を開けたが、これが掘削中の液流循環に有効に働き、3.8 m 長のコアが採取可能になったと考えられる。
- 6) チップの乾き密度は 440-500 kg/m³ であり、平均で 470 kg/m³ であった。
- 7) 掘削中のチップ回収率は 65-91% であり、平均で 80% となった。切削終了後に液中でバレルを空転させる時間が長い場合や切削ピッチが 2 の場合は、チップ回収率が平均よりも高くなる傾向にあった。
- 8) 3.8 m（最大コア長）を掘削した時のチップは、チップ室（全長 5.5 m）の 60-79% を占めた。チップ回収率の増加を考えても、チップ室の設計は妥当であったと考えられる。
- 9) チップ逆流防止弁は有効に働いていたが、実験途中で壊れた。今後さらに高耐久仕様にする必要がある。
- 10) モーターや減速ギアなどの新規に開発した駆動ユニットは順調に動作した。
- 11) モーター電流が 3.0 A を超えて掘削を継続し、コアバレルの中でチップが詰まると、バレルの引き抜き等により、1.5 時間程度、地上作業時間が増加することがわかった。
- 12) 改良したコアキャッチャーは、適切に動作した。

13) 採取したコアは、氷内部につながるクラック等がなく、質の良いコアであった。

謝 辞

陸別町の菊地規哲, 石橋 勉, 浜田 始, 小島靖典, 坂東孝己などしばれ技術開発研究所の多くの方々には, 氷の製作, 掘削実験塔および氷柱の準備だけにとどまらず, 掘削実験中に起きたさまざまな不具合に迅速に対処していただいた。また, 陸別町(金沢紘一町長)および陸別町教育委員会には実験場の提供など, 実験実施に当たりさまざまな便宜を供していただいた。また, 改良型氷床掘削ドリルのパイプを製作していただいた日本伸管株式会社の西中川工場長は掘削実験が行われた北海道陸別町まで自費で応援に駆けつけて下さった。北見工業大学の榎本浩之教授および小嶋真輔氏, 名古屋大学大学院の藤田耕史助教授には, 掘削実験の補助を担当していただいた。記してこれらの方々に感謝いたします。

文 献

- Dome-F Deep Ice Coring Group (1999): Deep ice-core drilling at Dome Fuji and glaciological studies in east Dronning Maud Land, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **27**, 333-337.
- 藤井理行 (2002): 南極氷床深層コアに記録された地球環境の変動. *極地*, **74**, 6-13.
- 藤井理行・本山秀明・成田英器・新堀邦夫・東 信彦・田中洋一・宮原盛厚・高橋昭好・渡邊興亜 (1990): 氷床深層ドリルの開発. *南極資料*, **34**, 303-345.
- 藤井理行・東 信彦・田中洋一・高橋昭好・新堀邦夫・中山芳樹・本山秀明・片桐一夫・藤田秀二・宮原盛厚・亀田貴雄・斉藤隆志・斉藤 健・庄子 仁・白岩孝行・成田英器・神山孝吉・古川晶雄・前野秀生・榎本浩之・成瀬廉二・横山宏太郎・本堂武夫・上田 豊・川田邦夫・渡邊興亜 (1999): 南極ドームふじ観測拠点における氷床深層コア掘削. *南極資料*, **43**, 162-210.
- Fujii, Y., Kohno, M., Motoyama, H., Matoba, S., Watanabe, O., Fujita, S., Azuma, N., Kikuchi, T. and Suzuki, T. (1999): Tephra layers in the Dome Fuji (Antarctica) deep ice core. *Ann. Glaciol.*, **29**, 126-130.
- Hondoh, T., Narita, H., Hori, A., Fujii, M., Shoji, H., Kameda, T., Mae, S., Fujita, S., Ikeda, T., Fukazawa, H., Fukumura, T., Azuma, N., Wong, Y., Kawada, K., Watanabe O. and Motoyama, H. (1999): Basic analyses of Dome Fuji deep ice core Part 2: Physical properties. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 90-98.
- 成田英器・藤井理行・高橋昭好・田中洋一・本山秀明・新堀邦夫・宮原盛厚・東 信彦・中山芳樹・渡邊興亜 (1995): 氷床深層掘削ドリルの開発 (II). *南極資料*, **39**, 99-146.
- 高橋昭好 (1996): 新型雪氷浅層コアドリルの開発. *雪氷*, **58**, 29-37.
- 高橋昭好・藤井理行・成田英器・田中洋一・本山秀明・新堀邦夫・宮原盛厚・東 信彦・中山芳樹・渡邊興亜 (1996): 氷床深層掘削ドリルの開発 (III). *南極資料*, **40**, 25-42.
- Takahashi, A., Fujii, Y., Azuma, N., Motoyama, H., Shinbori, K., Tanaka, Y., Nakayama, Y., Kameda, T., Fujita, S., Furukawa, T., Takata, M., Miyahara, M. and Watanabe O. (2002): Improvements to the JARE deep ice core drill. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **56** 117-125.
- Tanaka, Y., Takahashi, A., Fujii, Y., Narita, H., Shinbori, K., Azuma, N. and Watanabe, O. (1994): Development of a Japanese deep ice core drill system. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **49**, 113-123.
- 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.
- Watanabe, O., Kamiyama, K., Motoyama, H., Fujii, Y., Shoji, H. and Satow, K. (1999): The paleoclimate record in the ice core at Dome Fuji Station, East Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **29**, 176-178.

(2002年5月28日受付; 2002年6月24日改訂稿受理)