

南極ドームふじ基地における第2期氷床深層コア掘削

本山秀明^{1,2*}・高橋昭好³・田中洋一⁴・新堀邦夫⁵・宮原盛厚⁶・吉本隆安⁷・藤井理行¹・鈴木利孝⁸・古川晶雄^{1,2}・東久美子^{1,2}・鈴木啓助⁹・武藤淳公¹⁰・五十嵐誠¹・山崎哲秀¹¹・藤田秀二^{1,2}・斎藤健⁵・渡辺原太¹²・古崎睦¹³・李院生¹⁴・鄭址雄¹⁵・福井幸太郎¹⁶・中澤文男^{1,2}・亀田貴雄¹⁷・藤田耕史¹⁸・大日方一夫¹⁹・齊藤隆志²⁰・神山孝吉¹・木下淳²¹・東信彦²²・中山芳樹²³・渡辺興亜¹・高田守昌²²・小澤行雄²⁴・小林明雄²⁵・吉瀬也寸志²⁵

- ¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518.
- ² 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518.
- ³ (株)地球工学研究所. Geo Teecs Co. Ltd. (closed business).
- ⁴ (株)ジオシステムズ. Geosystems Inc., Oshidate 4-11-20, Fuchu, Tokyo 183-0012.
- 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 (株)アノウィ. Anori Inc., 1-43-401, Ohamacho, Nishinomiya 662-0957.
- ⁷ IOK/九州オリンピック工業(株). IOK/Kyushu Olympia Kogyo Co. Ltd., Kunitomi-cho, Higashi-morokata-gun, Miyazaki 880-1106.
- ⁸ 山形大学理学部. Faculty of Science, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-machi, Yamagata 990-8560.
- ⁹ 信州大学理学部. Faculty of Science, Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto 390-8621.
- ¹⁰ テンプル大学. Dept. of Earth & Environmental Science, Temple University, 317B Beury Hall, 1901 North 13th Street, Philadelphia, PA 19122, USA.
- ¹¹ (一社)アバンナット北極プロジェクト. Avangnaq Arctic Project, Midoricho 10-6, Takatsuki 569-0094.
- ¹² (株)地建コンサルタンツ. Chiken Consultants Co. Ltd., 11-27 Wakitahonmachi, Kawagoe, Saitama 350-1123.
- ¹³ 旭川工業高等専門学校. Asahikawa National College of Technology, 2-1-6, 2-jou, Syunkoudai, Asahikawa, Hokkaido 071-8142.
- ¹⁴ 中国極地研究所. Polar Research Institute of China, 451 Jinqiao Rd., Shanghai, P.R.China.
- ¹⁵ 韓国極地研究所. Korea Polar Reserach Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-70 gu, Incheon, 21990, Korea.
- ¹⁶ 立山カルデラ砂防博物館. Tateyama Caldera Sabo Museum, 68 Bunazaka-Ashikuraji, Tateyamamachi, Toyama 930-1305.
- ¹⁷ 北見工業大学地球環境工学科. School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507.
- ¹⁸ 名古屋大学大学院環境学研究科. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.
- ¹⁹ 大日方医院. Obinata Clinic, 3-2-1 Terazawa, Gosen, Niigata 959-1837.
- ²⁰ 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.
- ²¹ 東京農工大学工学部. Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Nakamachi 2-24-16, Koganei, Tokyo 184-8588.
- ²² 長岡技術科学大学工学部. Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka Nagaoka, Niigata 940-2188.
- ²³ (株)3D地科学研究所. 3D Geoscience Inc. (closed Tokyo office).
- ²⁴ (株)オーテックエレクトロニクス. Oh' TEC Electronics, Uehatta 140-41, Minami Alps, Yamanashi 400-0215.
- ²⁵ 九州オリンピック工業(株). Kyushu Olympia Kogyo Co. Ltd., Kunitomi-cho, Higashi-morokata-gun, Miyazaki 880-1106.

* Corresponding author. E-mail: motoyama@nipr.ac.jp

南極資料, Vol. 64, 284–329, 2020

Nankyoku Shiryô (Antarctic Record), Vol. 64, 284–329, 2020

© 2020 National Institute of Polar Research

The Second Deep Ice Coring at Dome Fuji, Antarctica.

Hideaki Motoyama^{1,2*}, Akiyoshi Takahashi³, Yoichi Tanaka⁴, Kunio Shinbori⁵, Morihiro Miyahara⁶, Takayasu Yoshimoto⁷, Yoshiyuki Fujii¹, Toshitaka Suzuki⁸, Teruo Furukawa^{1,2}, Kumiko Goto-Azuma^{1,2}, Keisuke Suzuki⁹, Atsushi Muto¹⁰, Makoto Igarashi¹, Tetsuhide Yamasaki¹¹, Shuji Fujita^{1,2}, Takeshi Saito⁵, Genta Watanabe¹², Atsushi Furusaki¹³, Yuansheng Li¹⁴, Chung Ji Woong¹⁵, Kotaro Fukui¹⁶, Fumio Nakazawa^{1,2}, Takao Kameda¹⁷, Koji Fujita¹⁸, Ichio Obinata¹⁹, Takashi Saito²⁰, Kokichi Kamiyama¹, Jun Kinoshita²¹, Nobuhiko Azuma²², Yoshiki Nakayama²³, Okitsugu Watanabe¹, Morimasa Takata²², Yukio Ozawa²⁴, Akio Kobayashi²⁵ and Yasushi Yoshise²⁵

(2020年4月28日受付; 2020年7月19日受理)

Abstract: The second deep ice coring project was carried out at Dome Fuji, Antarctica. Following the pilot hole drilling in 2001, deep ice core drilling was conducted for four years from the 2003/2004 austral summer season, reaching a depth of 3035.22 m in January 2007. The drilling was performed only in the summer season. Therefore, many improvements were made to the problems of the first deep ice core drilling system to enable efficient drilling. In particular, the core length that can be obtained at one time was increased from 2.3 m to 3.84 m, and the chip storage efficiency was enhanced. In this report, the outline of the drilling system, the method of drilling, the progress of drilling operation, and various troubles were reported. Also, future issues are indicated.

Keywords: deep ice core drilling, Dome Fuji, Antarctica

要旨: 南極ドームふじ基地において、第2期氷床深層コア掘削が行われた。2001年のパイロット孔掘削に引き続き2003/2004シーズンから4か年にわたり本格的な深層コア掘削を実施し、2007年1月に3035.22 m深に達した。夏期間のみの掘削としたので、効率よく掘削できるように第1期深層コア掘削システムの問題点を解決しながら多くの改良を施した。特に1回の掘削で採取可能なコア長を2.3 mから3.84 mにしたことと切削チップ収納効率を高めたことが大きい。本報告では、現地で使用した掘削システムの概要とともに、掘削の方法、掘削の経過を述べるとともに、掘削中に生じた様々なトラブルについても報告し、併せて今後の課題を示した。

キーワード: 氷床深層コア掘削, 南極ドームふじ基地

1. はじめに

氷床は降り積もる雪が積み重なり、自重により次第に氷化した後、塑性変形によって流動し、数万年～数十万年かけて海に押し出される。この氷床には様々な物質が大気中を輸送されて降り積もる。また、積雪中に含まれる空気は、積雪の氷化過程で大気と切り離されて独立した気泡として氷の中に保存される。この気泡は氷床中で長い時間をかけてクラスレート・ハイドレートに変化する。過去の大気が連続的に保存されているのは氷床しかない。また、氷床内陸部は年間の積雪量が50 mm/year以下と少なく、単位氷厚あたりの積算年数が大きく、氷厚3000 mに達する基底部には100年以上古い氷層が存在していると推定されている。氷床コアを用いて過去から現在への地球規模の気候変動、環境変動を明らかにする研究が進んでいる。

南極氷床の深層コア掘削を目的として1995年1月に日本南極地域観測隊の4番目の基地であるドームふじ基地が開設された(南緯77度19分, 東経39度42分, 標高3810 m, 図1)。ドームふじ基地は, 年平均気温 -54.4°C , 最低気温 -79.7°C という南極で最も高地で極限環境にある越冬基地で, ドームと呼ばれる高まりの頂上に位置しており, 氷の水平流動がなく深層掘削には理想的な場所である。

深度300–500 m以上の氷床深層コア掘削は, 氷床流動による孔の変形を防ぐために掘削孔に氷と同じ比重の液体(液封液)を入れて行う。ドリルの先端に円周状に氷を削るカッターが3枚取り付けられており, これを回転することで円柱状の氷床コアを採取する。このときに発生する切りくず(切削チップ)を掘削孔内に残さずにドリル内部に収納して, 地上に氷コアとともに回収する工夫が, ドリル製作のキーポイントである。1988年からドリルのプロトタイプを試作し, 国内のみならず南極氷床やグリーンランド氷床での実験を何度も行った。その結果, 日本独自の斬新なアイデアを国内の中小企業が持つ高い心意気と技術力で形にし, 世界最新鋭の氷床掘削機の開発に至った。

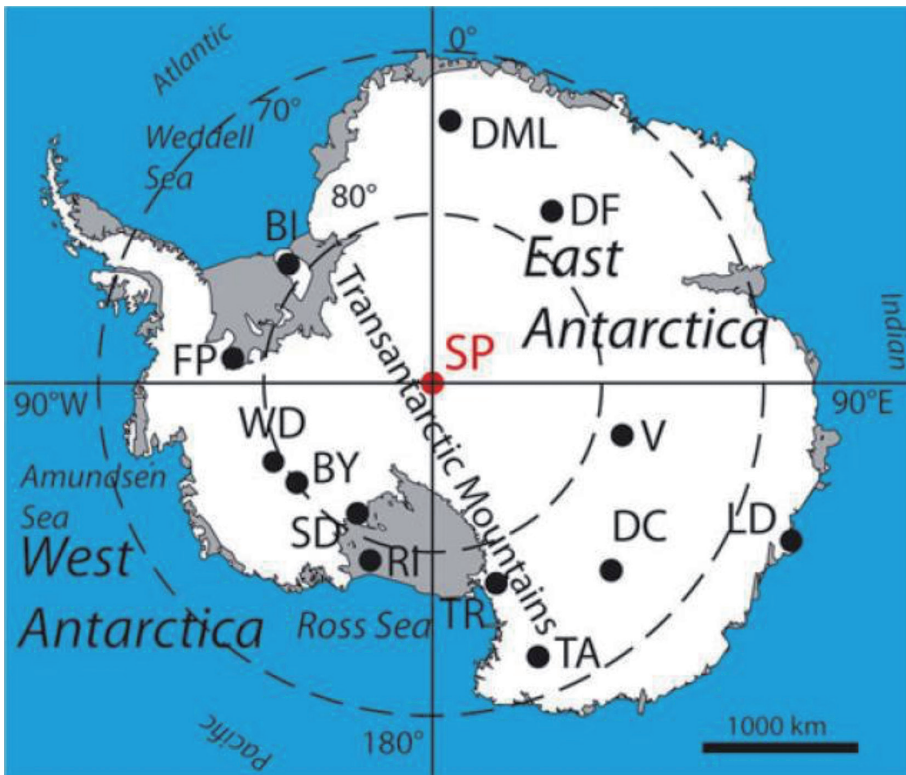


図1 南極での深層コア掘削地点 (Casey *et al.*, 2014 から引用)。DF: ドームふじ基地。
 Fig. 1. Map of Antarctica with recent deep ice core drilling locations (Casey *et al.*, 2014). DF: Dome Fuji, DML: EPICA-DML, DC: EPICA Dome C, V: Vostok, WD: WAIS Divide.

第1期ドームふじ深層掘削計画は、1995年8月から掘削を開始し、1996年12月に2503 mまで掘削した。しかし、掘削後の作業中にドリルが掘削孔に引っかかり、以後4年にわたってドリルの回収を試みたが回収できず、第1期ドームふじ深層掘削計画は中止することとなった。

ドームふじ基地の氷厚は氷床探査レーダー観測により 3028 ± 15 m と推定されていた (Watanabe *et al.*, 1999)。2503 m までの堆積環境が氷床深部まで続くことと仮定すると、100万年に遡る古い氷があると期待できた。このような科学的な価値が認められ、氷床表面から岩盤までの掘削を目指す第2期ドームふじ深層掘削計画を2001年から開始した。2001年から2003年にかけて掘削再開の準備を行い、現地の自然環境が厳しいことと掘削専門家の1年以上の南極への派遣が難しいことから2003/2004年から2006/2007までの夏期の4シーズンに深層掘削を行った。

ドームふじ基地での掘削期間を十分に取るため、南アフリカから南極大陸への移動及び南極大陸内の運航を開始した国際チャーター便 (DROMLAN: 日本を含む11カ国で運用) を利用してドームふじ基地まで敏速に隊員を派遣した。深層掘削は、途中トラブルはあったものの、3シーズン目の2006年1月23日に3028.52 m深までの掘削に成功した。掘削日数は延べ127日、掘削スピードは160 m/weekで、コアは割れもほとんどなく上質であった。これは、当時実施されていた深層掘削 (南極では Dome C, DML, グリーンランドでは NGRIP, NEEM) と同等の、世界最高レベルの掘削技術の成果である。

10数メートルと予想される岩盤までの氷床掘削及び岩盤採取の重要性が認められ、第48次観測実施計画として深層掘削を1年延長することとなった。この4シーズン目は岩盤近くの圧力融解点に近い温暖氷の掘削となり、氷床底面付近に存在する融解水の影響などもあって掘削は非常に困難であったが、2007年1月26日に岩盤直上の3035.22 m深まで掘削して終了した。

本報告は、上記の第2期深層掘削の経過とともに、実際に使用した掘削システム、採用した方法、遭遇したトラブル及び今後の課題について述べる。

国内外の氷床深層コア掘削機の開発及び掘削経過について以下にまとめた。ここで記述する。国内での深層掘削機開発は、Suzuki and Shimbori (1986) から始まり、Narita *et al.* (1954) による高液圧中での切削実験に続き、藤井ほか (1990)、Tanaka *et al.* (1994)、Fujita *et al.* (1994)、成田ほか (1995)、高橋ほか (1996) による本格的な第1期深層掘削機の開発へとつながった。その後、Takahashi *et al.* (2001) にて深層ドリルが改良され、亀田ほか (2002) にて国内テストが行われた。また、高橋 (2005) は氷床底部の温暖氷掘削につながる新たなドリルヘッドを開発し、Azuma *et al.* (2007) は、深層掘削時の掘削による発熱について述べている。ドームふじ基地での第1期深層掘削の経過については、藤井ほか (1999)、Fujii *et al.* (2001) にて報告された。齊藤・木下 (2005) と亀田ほか (2005) は第2

期深層掘削のための基地再開，新掘削場建設，掘削場整備について報告し，本山（2006），Motoyama（2007）は第2期深層掘削の経過について述べている．第1期及び第2期深層掘削の掘削機開発や掘削経過については，南極OB会編集委員会による「南極読本」（2019）にまとめられている．第2期深層掘削では掘削に関する様々なデータを記録しており，Motoyama *et al.*（2020）で発表している．

外国の深層掘削技術として，Augustin *et al.*（2007b）が氷床深部の温暖氷掘削について，Johnsen *et al.*（2007）がコペンハーゲン大学で開発された Hans Tausen ドリルについて，Shturmakov *et al.*（2014）が米国で開発された DISK ドリルについて，それぞれ報告している．Talalay（2014, 2016, 2020）は，深層ドリルのドリルヘッド，メカニカルドリルの掘削技術，サーマルドリルの掘削技術について，それぞれまとめた．最近の南極氷床での深層掘削経過について，Augustin *et al.*（2007a）が EPICA Dome C，Zheng *et al.*（2014）が Dome A，Wilhelms *et al.*（2014）が EPICA DML，Slawny *et al.*（2014）と Souney *et al.*（2014）が WAIS Divide，Litvinenko *et al.*（2014）が Vostok について，それぞれ報告している（図1）．グリーンランドの NEEM での深層掘削については，Popp *et al.*（2014a, 2014b）が報告している．表1に最近の南極氷床とグリーンランドで実施されている深層掘削をまとめた．

表1 最近の主な氷床深層コア掘削一覧.
Table 1. List of deep ice core drilling operations.

	掘削期間	最深深度(m)	最深年代(BP)	液封液の種類
<南極>				
EPICA Dome C	1999-2004	3270	80万年	Exxsol D30 and HCFC-141b
EPICA DML	2000-2006	2774	(25万年)	Exxsol D40 and HCFC-141b
Dome Fuji	1995-1996	2503	34万年	n-butyl acetate
	2003-2007	3035	72万年	n-butyl acetate
Vostok	1970-98, 2005-07 -2012(-2015)	3661 →3769	42万年	aviation fuel TS-1 and CFC-11(HCFC-141b)
WAIS Divide	2006-2011	3405	6.8万年	Isopar-K and HCFC-141b
South Pole	2014-2016	1751	5.4万年	Estisol-140
Dome A	2011-			n-butyl acetate
<グリーンランド>				
GRIP	1999-1992	3029	11万年	Exxsol D60 and HCFC-113
GISP2	1989-1993	3053	11万年	n-butyl acetate
NGRIP	1996-2003	3085	12万年	Exxsol D60 and HCFC-141b
NEEM	2008-2010	2537	13万年	Estisol-240/Coasol
EGRIP	2016-			Estisol-240/Coasol

2. 掘削システムと掘削施設

2.1. ドリル

2.1.1. 改良型深層ドリルのコンセプトと特徴

2.1.1.1. 基本コンセプト

基本コンセプトは、液封型深層メカニカルドリルである第1期深層ドリル（以下、旧ドリルという。藤井ほか, 1999, Fujii *et al.* 2001）と変わらない。すなわち、改良型深層ドリルはドリルを最も特徴付けている切削チップ処理システムについて、旧ドリルと同じアルキメディアンポンプ方式（スクリューポンプの一種）を継承した。アルキメディアンポンプとは「コアバレルの表面にベルトをスパイラル状に巻き付けたもの」をいう。これを液中で回転させると、スパイラルが液を送るのでポンプの役目をする。一種のスクリューコンベアであって、オホーツク海で運行されている流水砕氷船ガリンコ号の推進器と似ている (<http://www.garinko.com/>)。この方式は構造が単純であるため、故障が少ない、取り扱いが容易、などの利点があって、国内で開発された深層ドリル最大の特徴である。表2に、旧ドリル（DF1）、

表2 第1期で用いた深層ドリル（DF1）と第2期で用いた改良型深層ドリル（DF2）の比較。

Table 2. Specification of the JARE DF1 and the improved DF2 drill.

	DF1	DF2	DF2_2 (ショートドリル、氷床底部用)
掘削深度	112 → 2503 m	121 → 3006 m	3006 → 3035 m
ドリルタイプ	液封型電動メカニカルドリル	変更なし	変更なし
コア径 × コア長	94 mm × 2,200 mm	94 mm × 3,840 mm	94 mm × 2,000 mm
コア掘削速度	15-20 cm/min	15-25 cm/min	変更なし
ドリルサイズ: 外径 × 全長	122 mm × 8,593 mm	122 mm × 12,200 mm	122 mm × 8,106 mm
カッター	3 x ブロックタイプ	no change	スペシャル
コアバレル: 外径 × 全長	101.6 mm × 2,321 mm	101.6 mm × 4,000 mm	101.6 mm × 2,256 mm
Cチップ室: 外径×全長	112 mm × 3,260 mm	112 mm × 5,533 mm	112 mm × 3,160 mm
チップ密度 (設計上)	$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 550 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 550 \text{ kg/m}^3$
パイプの穴加工: 直径 × 個数		hole: 1.2 mmφ × 45,000個	hole: 1.2 mmφ × 25,200個
切削チップの輸送	Archimedean pump & 1 turn screw booster	Archimedean pump & 1 or 0.75 turn screw booster x 2-3	Archimedean pump & 1 or 0.75 turn screw booster x 2
ドリルモーターの仕様	AC brush-less motor 600 W for 15 min at 12,000 rpm	DC permanent magnetic motor with brushes. 500 W for 15 min at 4,000 rpm	変更なし
減速機の種類と減速比	4 stage planetary gear 1/170	Harmonic drive type: CSF17, 1/100, 1/80(, 1/50)	変更なし
掘削情報	Monitoring computer (10 parameters)	ほぼ同じ	変更なし
Pssur耐圧室: 外径 × 全長	122 mm × 1,700 mm	変更なし	変更なし
耐圧性能	35 MPa	変更なし	変更なし
アンチトルクのタイプと幅	3 x leaf spring, W=25 mm	3 x leaf spring W=30 mm	変更なし
ケーブル: 直径 × 全長	7H-314K 7.72 mmφ × 3,500 m	変更なし	変更なし
液封液	n-butyl acetate	変更なし	変更なし
特記事項	Borehole deameter 135 mm	1. Check valve to prevent chips from flowing out during drill ascent. (2. Super banger)	1. Special cutter mount 2. Teflon coating: drive shaft, screw booster, cutter, core catcher, outer tube, core barrel

改良型深層ドリル（DF2）及び氷床底部の温暖氷掘削用に製作したドリル（DF2_2）の主要な特徴をまとめた。図2に改良型深層ドリルのポンチ絵を載せた。1回の掘削で直径が94 mmの氷コアを3.84 mの長さ毎に採取することができる。掘削の様子を図3で示した。

2.1.1.2. 掘削作業時間の短縮

この点は改良型ドリルにおいて重点をかけた最大のコンセプトである。最大3.84 mという長いコアを取ることによって、掘削回数の減少、総掘削時間の短縮を狙った。しかし、コアバレルを長くすれば長いコアが取れるというものではない。このように長いコアの採取を可能にしたのは切削チップ収納室に45000個の小穴を開けるというアイデアで、切削チップと液封液を効率よく分離して均一に充填することが可能になった。

2.1.1.3. 故障やメンテナンスの軽減によるドリルの完成度の向上

第1期掘削の経験と反省によって、徹底的な改良を行った。コアバレル以外の最大の改良部分は、ドリルモーターと減速機から構成される駆動部である。その他の改良点は、アンチトルク、電気接点、耐圧室シール、チップ室スクリーン、逆流防止弁、スタック脱出用スパーバンガー、カッターマウント、カッター、コアキャッチャーなど多数に及ぶ。これらを徹底的に研究・改良した結果、故障率やメンテナンス量は大幅に減少した。

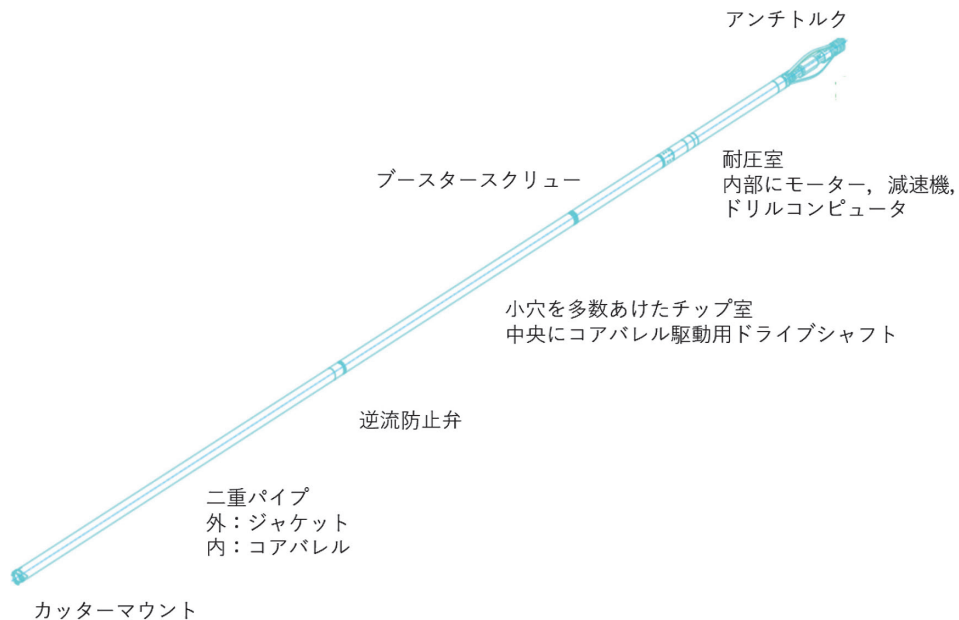


図2 第2期深層掘削に用いた改良型深層ドリル。全長12.2 m、パイプ径123 mm。

Fig. 2. DF2 drill cutaway mock-up showing main sections of the drill sonde. Full length 12.2 m, a diameter of pipe 123 mm.



図 3 ドームふじ基地での深層掘削作業風景.

Fig. 3. Deep ice core drilling operation at Dome Fuji.

2.1.2. 各部分の説明と旧ドリルとの比較

2.1.2.1. アンチトルク

①リーフスプリングの材質

氷掘削時にドリルの自転を防止するためにアンチトルクとして作用するリーフスプリングが低温脆性により折れる可能性がある。そのため、低温脆性を起こさないステンレス系バネ材を採用した。ばね材の欠点は、硬度が「はがね系」よりやや低いことである。

②リーフスプリングの幅

リーフスプリングの幅を旧ドリルの 25 mm から 30 mm に幅を広げた。この改良によって剛性が上がり、ドリル保持力の増加が期待できる。

③リーフスプリングの形状

最適の曲げ形状を得るため、掘削孔と同じ直径のパイプで実験を行った。その結果、 $y = 0.001x^2$ の放物曲線の形状が最も性能が良いと判断し、採用した。

④リーフスプリングレバー

リーフスプリングを固定している部品をスプリングレバーという。旧ドリルの首振り式(回転式)から固定式に変更した。首振り式は保持力の増強を狙ったものであったが、その効果ははっきりしない。固定式の方が調整しやすく、リーフスプリングの幅と形状を改良して保持力の増強が期待できるので、固定式とした。

⑤リーフスプリングの角

リーフスプリングは孔壁をこすりながら上下する。スプリングの角（エッジ）は摩耗し、次第に保持力も低下する。適宜、リーフスプリングの角を砥石で研ぐことを徹底した。

2.1.2.2. コイルスプリング

アンチトルクの内部にコイルスプリングを組み込んで、この伸び縮みを接地圧検出用センサー（差動トランス）で計測する。差動トランスのストロークは 100 mm であるので、接地圧ゼロ（ドリルをケーブルで吊って空中に浮いている状態）でちょうどスプリングが 100 mm 縮むことが最も望ましい。計算でバネ強度を求め、100 mm の変化で 0-150 kg に対応するスプリングと 0-160 kg に対応するスプリングを準備した。現地でドリル全体が液封液中にあるときに、スプリングの縮み具合を確認して、どちらかを選ぶ。

2.1.2.3. リニア電気接点

旧ドリルではスプリングで伸び縮みするところの電気配線に、リニアに作動する専用の 4 回路接点を採用した。しかし、接点に切削チップが噛み込み、導通不良を頻繁に起こした。改良型では 100 mm 以上伸び縮みする、単に余裕を持たせた電線に変更した。接点がないので導線不良はありえず、簡単に交換できる。最終的には、電線を螺旋状に巻いたものに変更した。

2.1.2.4. スリップリング

旧ドリルではスリップリングの軸の破損と電子制御系の導通不良が多く生じたので次の対策を行った。

①破損対策

スリップリングの軸を保持するベアリングの数を 1 個増やし、回転時に軸ブレを起こさないように改良した。

②導通不良対策

旧ドリルでの導通不良の原因は、スリップリングケースの圧力バランス穴から内部に侵入した切削チップによるものであった。侵入を防止するには、耐圧式か液封式にすることが考えられる。しかし、この方式は、国内の製作メーカーに請け負ってもらえなかった。そこで、特製のチップ除けフィルタを独自に考案し、圧力バランス穴の入口に取り付けた。

2.1.2.5. 耐圧室

①本体（特にシール部分）

JIS の圧力容器製作基準に基づく材料選定、強度計算、加工をしており、十分な強度を持っている。耐圧試験においても 350 kg/cm^2 の圧力下でドリルモーターを運転して、漏れなどの問題がないことを確認した。使用中に問題が出るとすれば、上下の蓋のシール部分であろう。シール面にはいささかの傷があっても漏れの原因となる。改良型ドリルではシール面の加工に特に注意し、焼き入れを施して硬度を高くして傷が付きにくいようにした。

②耐圧電気コネクタ（端子）

旧ドリルにおいては、耐圧電気コネクタに対する問題は出なかった。リード線がカプトン被覆というエナメル線のようなもので、傷か付きやすいので、被覆をはがさないように気を付けて取り扱い、取り換えのときは専用の取扱要領書に従うこととした。

2.1.2.6. ドリルモーター

①永久磁石型モーターへの変更

旧ドリルのモーターは、ブラシレス DC モーターという、コイル側に回転磁界を必要とする非常に複雑なものであった。また、出力やトルクを上げるために、定格が 12000 rpm という高速回転であった。このため、複雑なインバータドライバをドリルコンピュータに組み込む必要があること、高速回転のため減速機の潤滑が完全でない、などの欠点を持っていた。改良ドリルでは、永久磁石型モーターの採用によって、これらの問題を一挙に解決した。さらに 2 本の線のみで運転でき、プラスマイナス相を入れ替えれば逆転も簡単にできる。定格が 4000 rpm という低回転速度で以前と同等の出力やトルクを得られる、などのメリットがある。一方、ブラシから出る火花がドリルコンピュータの通信系に作用し、地上との通信を妨害することが懸念された。しかし、ノイズフィルタの採用や通信系の強化によってこの問題は解決した。

②モーターブラシ

モーターブラシは消耗品であるが、毎日使用したとしても 100 日程度の運転では交換の必要はないと考えられる。また、密閉構造であるため現場での交換は難しく、ブラシ交換のためにはメーカーへ持ち込むことが必要となる。そこで、ブラシ交換が必要と判断される場合は、モーター全体を交換することとした。

③低温による減磁への対策

フェライト系磁石は、低温下で逆磁力が加わった場合、次第に磁力が減っていく。この現象を「低温減磁」という。氷切削起動時のように、大きいトルクを必要とする場合、このケースに相当する。著しく減磁が進んだ場合、モーター定格出力が出ないことになる。この問題については、マイナス 50℃ の環境でモーターの入り/切りを繰り返した試験を行い、通常の使用であれば減磁に関して問題がないことを確認した。ただし、モーターは常に低速からスタートし、徐々に回転スピードを上げていくことを原則とした。こうすることが減磁や減速機の破損を防ぎ、コアバレルやドライブシャフトに対するダメージを防止することになる。

2.1.2.7. 減速機

①旧ドリルでの問題点

旧ドリルでは定格の入力回転数が 12000 rpm と速く、減速機でコアバレルの回転速度を 100 rpm 以下にする必要があるが、市販の減速機では対応できず、減速段数が 3 段の遊星歯

車からなる特注品を使っていた。特注品であっても、このような高速回転では、歯車のグリスが遠心力で吹き飛ばされて潤滑不十分となり、歯車の寿命が短かった。

②ハーモニック減速機の採用

改良型ドリルのモーターは定格 4000 rpm と低速であるため、実績のあるハーモニック減速機の採用が可能になった。この減速機のメリットはいくつもあるが、一つは減速段数が 3 段から 1 段に減ったゆえの、機械効率の向上である。その他、給油回数の減少、減速機厚さの短縮、ギア寿命の延長などのメリットがある。

2.1.2.8. 出力軸シール

旧ドリルでは、出力軸周辺から液漏れが起こり、耐圧室内部へ液封液が浸入することが度々あった。そのため、下記の対策を施した。

①ダブルシールの採用

出力軸に回転シール（商品名：バリシールロータリー）を直列に 2 個、取り付けた。これにより、液漏れの減少が見込まれた。ただし、ダブルシールにしたため、第 1 段目シール外側に内圧用平面シール 1 個を増設した。これにより、第 1 段目シールが漏れた時、2 段目が有効に働き、外側から液が耐圧室に侵入するのを防ぐ。

②シャフトの焼入れ強度

旧ドリルの液漏れの主な原因は、シールがあたる部分のシャフトが摩耗したことにあった。200 気圧や 300 気圧という高圧でシールがシャフトに押し付けられて回転するので、シャフトの摩耗は避けられない。摩耗を減らすために、シャフトに焼入れをして硬くした。改良型ドリルでは、高周波焼入れを採用し、硬度 HRC55 以上とした。

③グリスの注入

シールの寿命を長くするため、シールには十分なグリスを詰め込んで組み込んだ。出力軸シールはロータリー型が 2 か所と内圧平面型が 1 か所の計 3 か所にある。出力軸シールの下方にあるベアリングやオイルシールも、同様にグリスが必要である。最下部にはオイルシールをつけて、液封液である酢酸ブチルが入りにくくした。

2.1.2.9. チップ室

材質をアルミ材としてスクリーン面積を増大したチップ室は、長さ 4 m のコアバレルとともに、改良型ドリル最大の特徴である。

①材質

旧ドリルと同じステンレス材で検討したが、ジャケットとつなぐと重すぎて、人力では取り扱いが困難であった。そのため、アルミ系の強度が高い材料で特製することとし、引き抜き技術や精度の確保を念頭に試作と検討を進めた。その結果、6S51-T6 という高硬度アルミで引き抜きパイプを作り、アルマイト処理によって表面硬化させ、約 40 kg/mm² という一般鋼材並みの引っ張り強度が得られた。

②スクリーン面積の増大

旧ドリルのポンプ試験を繰り返し行い、ポンプ圧力はせいぜい数 mm 水柱程度で、液封液と切削チップを輸送する能力が非常に弱いことがわかった。このポンプでチップ処理を行うためには、流路中の抵抗をできる限り減らす必要がある。抵抗になる要素で大きいものは、(1) 貯蔵された切削チップの隙間を液封液が流れるときの抵抗、ならびに (2) チップ室から液封液が外に出るスクリーン通過時の抵抗の2点である。そこで、(1) と (2) の両者に対応する目的で、スクリーン面積を旧ドリルの 70 cm^2 から 580 cm^2 に大きく上げた。改良型ドリルのスクリーンはシャフト頂部の円形スクリーンと、チップ室のパイプにあけた直径 1.2 mm の穴 45000 個から構成されている (図4 (a))。 (2) に関しては、北海道陸別町で行った実験 (亀田他, 2002) において、このスクリーン面積を拡大した有効性は立証されたが、もう一つの抵抗である (1) に関しては、切削チップを大きくする氷の切削技術とドライブシャフトにつけた複数のブースターによる切削チップの均一な充填で対応した。

③チップの詰めすぎ

チップ室に切削チップを詰めすぎるとコアバレルやドライブシャフトを抜くのが困難になる。チップ室の内面は、ドライブシャフト引き抜き時の切削チップによる抵抗を減らすために研磨を行い、さらにアルマイト加工を行った。それでも切削チップがきつく詰まった場合には、引き抜けないほどの摩擦抵抗となる。きつく詰まる原因は、ブースターの選定とドライブシャフトへの固定位置、および切削時間にある。ブースターの送る力が強いとチップ室上部で切削チップをパッキングする。バレル回転時間が長すぎても同じことが起きる。対応策として搬送力の弱いブースターを使い、さらに切削ピッチが大きくバレル回転数の速い高速切削をして、掘削時間を短く済ますことが望ましい。ブースターの個数やその設置位置も均一な充填のためには重要である。なお、2004年1月の掘削では、実際に切削チップの詰めすぎでシャフトが抜けなくなったが、2時間程度放置したら自然にチップ室のパイプにあけた多数の小穴から液封液が流出し、簡単にシャフトを抜くことが出来た。

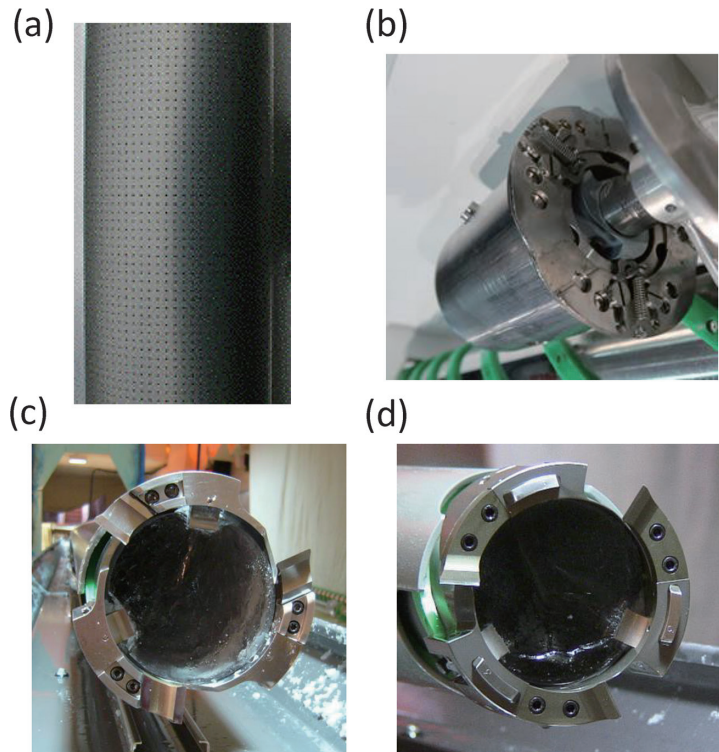


図 4 改良型深層ドリルの特徴.

(a) 安定な切削を可能にする穴あきチップ収納部. (b) ドリル巻き上げ時のチップ流出防止用逆流防止弁 (閉じた状態). (c) 改良型深層ドリルのカッターマウント. (d) 氷床底部掘削用ドリル (ショートドリル) のカッターマウント.

Fig. 4. The features of DF2 drill. (a) Chip chamber with many small holes for stable cutting. (b) Check valve for current adverse prevention of chips during the drill ascend. (c) Cutter mount of improved DF2 drill. (d) Cutter mount of short drill DF2_2 for warm ice.

2.1.2.10. ドライブシャフト

①シャフトの太さ

ドライブシャフトとしたパイプの寸法は、外径 27.2 mm、厚さ 5.5 mm、長さ約 5.7 m である。もう少し太い材料を使いたかったが、シャフトを太くすれば、それだけチップ室の貯蔵容積が減るので、厚みを増して太さは抑えた。

②シャフトの穴

ドライブシャフトの内径は 16.2 mm の空洞である。この空洞は、ドリルを下ろすときに液封液が流れる流路でもある。ドリルの自由落下速度を稼ぐため、この設計とした。

2.1.2.11. ブースタースクリュー

①ブースタースクリューの役割

ドライブシャフトに取り付けたブースタースクリューが液中で発生する圧力は非常に小さいことをポンプテストで確認した (Takahashi *et al.*, 2002). 切削チップの吸引はアルキメデアンポンプ(コアバレル)が主に行っていて、ブースターはほとんど関与していなかった。ブースターはポンプとして液体を送る能力は非常に小さいが、チップ室に入ってきた切削チップを圧密しながら充填する役割をしている。さらに、充填された切削チップを分割することによってシャフトを引き抜く時の過度な抵抗を防ぐ、シャフトを水平に保ち駆動部のジョイントに差し込めるようにする、掘削時にシャフトが遠心力でぶれるのを防ぐ、という付随的な役割がある。3.84 m 長のコア掘削で発生した切削チップを乾き密度 550 kg/m^3 としてチップ室に充填する容量としたので、切削チップは適度に圧密する必要がある。圧密する能力が異なったブースターを製作し、切削チップの収納が最適になるように、種類、数、取り付け位置をいろいろ変えて掘削した。

②ブースターによるジャケット内側の損傷

ジャケットがアルミ製であるのに対してブースターがステンレス製のため、ブースターの外径の角が、ジャケットの内側を削ってしまうことが国内実験で生じた。そのため、ブースターの材質を柔らかいアルミに変更し、さらに角を丸めた。

2.1.2.12. 逆流防止弁

逆流防止弁の動作として、シャフト正転時（ドリル上端から見て右回転）は弁が引っ込んでおり、切削チップがチップ室の中へ入るのを妨げない。コア掘削停止後にドライブシャフトを逆回転させると板バネが弁を押し出し、コアバレルとジャケットの隙間を塞ぎ、ドリル引き上げ時の切削チップの流出を防止する。90度の逆転で弁を押し出すように設計した(図4(b))。

2.1.2.13. スーパーバンガー

①目的

スーパーバンガーは掘削したコアが切れない場合や、ドリルがスタックしたような場合に用いる。ただし、コアバレルが固定されて動かない場合にものみ作動する。

②作動方法

掘削したコアが切れずにドリルがスタックされていると仮定する。まず、ケーブルに適度なテンションをかける。そのまま、ドリルモーターを逆転すると、スーパーバンガーのピンがコアバレルの定位置からずれて、縦溝に入った瞬間に縦溝の長さ 100 mm だけドリル本体が飛び上がり、コアバレルにショックを与えることでコアを切り、ドリルを引き抜く。一回で回収できない場合には再度ドリルを下し、シャフトを正回転してピンを定位置に収めた後、同じことを繰り返す。

③グリーンランド NGRIP の深層ドリルにおける同機構との比較

NGRIP の深層掘削で使われたドリルのスパーバンガーは、コアバレルとドライブシャフト下端のバレルジョイントが、掘削孔の底で完全に切り離せる構造である。高価なドリルを失わないため、ドリルがスタックした場合、コアバレルのみ孔の底に残して、ドリル本体は回収できるようになっている。しかし、通常の掘削中にもコアバレルが外れてしまう可能性があるため、第2期掘削用の改良型ドリルは切り離し構造にはしなかった。

④問題点

(1) コアバレルが回転するような場合は、ドリルモーターに逆転をかけてもコアバレル共々回ってしまって、ピンが作動しない。ドリル本体自身が固定されていたら、バンガーのピンにテンションがかけられないので、この機構は働かない。ドリル本体は上下するが、コアバレルは拘束されていて回らない場合のみに有効である。

(2) 掘削終了後、ドリルモーターを逆転すると、逆流防止弁が働くとともに、スパーバンガーのピンが動くことがある。コアバレルとスパーバンガーの摩擦が大きいと、逆流防止弁が働いてもスパーバンガーが働くまでには至らないが、摩擦力が弱いとスパーバンガーが働いてしまい、コアバレルがジャケットから 10 cm 飛び出して上がってくる。

2.1.2.14. ジャケット

ジャケットはチップ室と同じ材料、同じ製法で作成した。公差として、長さ 5 m で曲がり 1 mm 程度に仕上げた。チップ室とジャケットは角ネジで接続するが、逆ネジとしたのでコアバレルの回転で締まる方向にある。ジャケットパイプの内側には 6 列のリップをつけた。

2.1.2.15. コアバレル

4 m 長のステンレス鋼管をコアバレルとした。この長いコアバレルが、真っ直ぐに仕上がっていないと、ジャケットの中でスムーズに回転できない。コアバレルの表面にアルキメディアンポンプとなる 3 列のポリエチレンベルトを取り付けた後、旋盤加工で真っ直ぐに仕上げた。現場においても、ダメージを与えないように、取り扱いには十分気を付ける必要がある。

2.1.2.16. カッター

①カッター

カッターは旧ドリルの仕様と、ほぼ同じで、互換性がある (図 4(c))。

②カッターの種類

材質は低温脆性の少ない、ニッケルを少量含んだ ATT といわれる材料で、3 種類のカッターを作成した。Type1: すくい角 35 度、刃角 40 度、にげ角 15 度、傾斜角なし、Type2: 40 度、35 度、15 度、なし、Type3: 40 度、35 度、15 度、9 度。この 3 種類のカッターを氷温や氷の硬さに応じて使い分けた。Type3 は改良型ドリルのために新たに設計したカッターであり、刃先を回転方向に対し 9 度傾けた。このカッターで切削した場合は、カンナをかける場合に真っ直ぐに引かずにやや傾けて引く状況と同じで滑らかな切削が得られることを期待した

が、傾斜角なしとの明確な違いはなかった。また、2005/2006のシーズンにはType1とType2の刃角を30度に薄くしたカッターを持ち込んだが、コア掘削時に刃先の損傷が頻繁に生じたため、ほとんど使わなかった。

③カッターの高さ調節

カッターの刃先が氷に対して同一面にあって掘削することが望ましい。コア表面についた傷である螺旋の間隔が一定であるかないかで、同一面かどうか判断できる。カッターゲージに3個一組のカッターを取り付けてハイトゲージでそれぞれの高さを測る。高さのばらつきがある場合は、薄板を適当な大きさに切って、カッターの底面へ挟んで調節した。新品のカッターは、高さを $\pm 10 \mu\text{m}$ (1/100 mm)の公差で製作と検査をしたので高さ調節の必要はない。

⑤履歴の記録

すべてのカッターには製造番号が明記してあり、それぞれ掘削深度や研磨状況などの履歴を残した。

2.1.2.17. シューと切削ピッチ

①シューの調整

コアバレルが1回転するときに3枚のカッターでコア掘削した深さを切削ピッチという。この切削ピッチを調節するためのシューとして、切削ピッチ2, 3, 4, 5 mmに対応するP2, P3, P4, P5の4種類のシューを製作した。シューには切削ピッチを刻印した。

②切削ピッチ（シューの選択）

切削ピッチは氷の硬さや温度など、状況に応じて選択するが、コアの品質やドリルモーターの電流値に問題がなければ、大きな切削ピッチで掘るべきである。その方が、粒径の大きいチップが得られ、切削チップの輸送やチップ室での収納に関して、このドリルの性能がより良く発揮される。経験的には3 mmあるいは4 mmの切削ピッチで掘ることが望ましい。

2.1.2.18. コアキャッチャーとコアキャッチャーばね

①コアキャッチャーとばねのかたち

旧ドリルでは、コア掘削後にコアキャッチャーによるコアブレイクがうまくいかないことが起きた。新たにデザインしたブロック型コアキャッチャーを使ったが、コアキャッチャーを氷に押しつけるばねの力が弱く、刃先が氷に食い込まずにコア回収に失敗したと思われる。改良型ドリルのコアキャッチャーはドッグレッグ型とし、ばねは「巻きばね」ではなくU型のばねで、コアキャッチャーの背を押すこととした。このばねの方がコアキャッチャーを氷に押し出す圧力が強く、ばねが緩んだとしてもドライバーを用いて強さを元へ戻すことが可能である。このばねは、0.8-1 mm径のピアノ線をU字に曲げて製作した。

②コアキャッチャー

カッターと同じ硬度に焼入れを行い、常に鋭い刃先を保つように設計した。

③コアキャッチャーピン

旧ドリルではコアキャッチャーを取り付ける4 mm径のピンが曲がったので、5 mm径に強度を増し、さらに焼き入れた。

2.1.2.19. カッターマウント

旧ドリルのカッターマウントは、使用中にクラックが入り、バラバラに割れたことがあった。この教訓を生かし、形状、材質、加工方法の点において、考えられる限りの対策を施した。凹型の角にはアールをつけ、最良の機械構造鋼とし、焼入れ焼戻しの調質をして内部応力を除去した。しかし、鋼の低温脆性温度(-40℃)をはるかに超える使用条件である上、衝撃がかかる部分であるので、脆化してクラックが出る可能性はある。

2.1.2.20. ドリル操作盤

旧ドリルとの変更点は、逆転スイッチが付いたことのみである。ドリルモーターは単純な永久磁石式直流モーターであるので、プラスマイナスの極性を反転させるのみでモーターが逆転する。逆転は、掘削終了後の逆流防止弁やスパーバンガーを作動させるときに用いる。

2.1.2.21. ウインチ操作盤

第1期掘削において、掘削時のウインチの送り出しダイヤルの目盛(ウインチモーター駆動用インバーターの周波数設定ダイヤル)が見にくく、微速繰り出しが困難であるという問題があった。そのため、インバーターの周波数設定ダイヤルを、高速ダイヤルと低速ダイヤルに分割し、微速繰り出しを容易に調整できるようにした。

2.1.3. 掘削のポイント

2.1.3.1. 切削チップの粒径

大きい切削チップを採ることが改良型ドリルの性能を発揮させることになる。大きいチップを採るためには、(1)切削ピッチを大きくする、(2)すくい角の大きいカッターを使う、の2つの方法がある。経験上、切削ピッチ3~4 mmのシューとすくい角40度のカッターの組み合わせが適している。ただし、掘削したコアの品質、氷の硬さ、氷の温度、モーター電圧、刃の食いつき、すべりなどの掘削状況を総合して判断する。

2.1.3.2. 自動掘削

①自動掘削のメカニズム

旧ドリルおよび改良型ドリルは、刃先の接地圧を一定に保ちながら掘削できる「自動掘削システム」に対応している。カッターが着底すると、ドリルの荷重がかかっているドリル上部のスプリングが縮んで、これにつながっている接地圧センサー(差動トランス)が動き、接地圧の変化を検知する。コア掘削中に接地圧が設定値以上になると、ウインチモーターがOFFになりケーブルの繰り出しを止める。そのままコア掘削が進むと接地圧が下がってきて(カッターが浮き気味になってきて)、接地圧の設定値以下になるとウインチモーターがONになりケーブルを送り出す。制御方式では、ON-OFF制御であるが、ドリル上部のスプ

リングとウインチケーブルの弾力のため、連続した滑らかなコア掘削が可能である。しきい値となる接地圧は任意に設定できる。

②接地圧

掘削に最適な接地圧をいくつに設定するかは、掘削の状況に応じて決める必要がある。なるべくドリルの荷重をかけず接地圧を小さくしたほうが、曲がりのない鉛直な掘削が可能となる。ただし、接地圧が小さすぎるとカッターが滑る、実際の切削ピッチがシューの設定ピッチより小さい、ということにつながる。このように接地圧は、掘削孔の曲がりや掘削の安定性などに重要で決定的な影響があるので、慎重に調整する必要がある。

③自動掘削

非常に安定した掘削ができるので、掘削条件が確定したら「自動掘削」を通常の掘削方法としてよい。

2.1.3.3. コア質

コア解析に支障があるような質の悪いコアを掘削すべきではない。国内での氷掘削実験ではカッターが削っていくと底面の深さ方向にクラックが走ることが見受けられた。このクラックを発生させないための工夫が必要である。例えば、(1) 切削ピッチを小さくする、(2) 接地圧を小さくする、(3) 傾斜角付きカッターを使う、などが考えられる。いかに良質なコアを採るかは掘削技術の重要なテーマであるが、確立された方法がなく、試行錯誤で対応する。

2.1.4. 氷床底部ドリル（ショートドリル）

3000 m 深の氷床底面付近は約 270 気圧という高圧下にあるため、圧力融解点が -2°C 近くまで上昇する。刃先にかかる圧力や、ドリル先端部の回転の摩擦熱で氷が融解するが、すぐに冷やされて再凍結が起きると思われる。また、切削チップも輸送中に容易に圧密されて固化し、チップ輸送を阻害する。そのため 4 m もの長いコアを 1 回の掘削で得ることは困難と思われる。そこで、ドリル全体を短くして操作性を向上させる、カッターマウントの凸凹を限りなく無くしてチップの付着を軽減する（図 4 (d)）、切削チップの輸送経路（カッター、コアキャッチャー、コアバレル表面、逆流防止弁、ブースター、ドライブシャフトなど）にはテフロンコーティングして、滑り良くする、という対策を講じた 2 m コア掘削用の氷床底部ドリルを開発した。カッターマウントは温暖氷河掘削用に開発したもの（通称ドルフィンマウント、高橋、2005）を深層掘削用カッターマウントのデザインに取り入れ、カッター、シューとコアキャッチャーも新たに設計した。

2.2. ウインチ、ケーブル、マスト

ドームふじ基地にて第 1 期深層掘削で使用した深層ウインチとマストを、第 2 期深層掘削用の新掘削場に移設した（亀田他、2005）。移設後、第 1 期深層掘削と同じ仕様で 3500 m のアーマードケーブルをウインチドラムにセットした。ドリルの全長が 8.6 m から 12.2 m に長

くなったので、マスト長を延長した。

2.3. 掘削周辺機器

2.3.1. チップ回収器

掘削孔中に浮遊あるいは固まって残留している切削チップを回収する装置で、全周がメッシュのパイプである。深層ドリルのチップ室とドライブシャフトを取り外して、代わりにチップ回収器を取り付ける。回収器の上部にはドリルモーターで90度回転すると閉じる窓があり、液抵抗を減らして下すことができる。下部にはバタフライ弁があり、下すときにはバタフライが跳ね上がり、下部リングの効果で効率よくチップが回収器に入る。引き上げるとバタフライ弁が閉じるとともにストッパーが外れて下部リングが下がり、液の流路を確保する。メッシュサイズが直径1.5 mmと2.0 mmの2種類を用意した。4 m長、あるいは分割して2 m長で使用する。

2.3.2. ベイラー

掘削孔の目的深度から液をくみ上げるとき、または特殊な液を目的の深度に注入するときに用いる。深層ドリルのチップ室とドライブシャフトを取り外して、代わりにベイラーを取り付ける。上下端に回転弁があり、ドリルモーターにつながった1本のシャフトで回転する。液をくみ上げるときには弁を「開」のまま下し、目的深度で弁を閉じて引き上げる。液注入時では弁を閉じて液を入れて蓋をして、目的深度で弁を「開」とする。

2.3.3. ケーブル巻替え装置

3500 m長のウインチケーブルが巻かれたドラムをウインチ巻替え装置にセットする。ラッシングベルトをドラムの錨にかけて摩擦抵抗とし、途中のディスクブレーキ機構とあわせて、張力が0.4~0.6トンになるようにマストのシーブに付けたロードセルの測定値で調整しながら、深層ウインチのドラムに巻き取る。

2.3.4. 切削チップからの液封液回収

工業用大型脱水機を用いて、地上に回収した切削チップから液封液を回収した。専用の木綿袋に液封液まみれの切削チップを入れて脱水機にかけた。液封液を絞り出した後の切削チップの液封液含有率は5-15 vol%であった。

2.4. 掘削場

第1期深層掘削の掘削場は雪面を4 m掘り下げたが、作業量を減らす目的で3 m掘り下げることとし、マストを直立させたときに必要な空間は高屋根で対応した。詳細は齊藤・木下(2005)、亀田ほか(2005)を参照のこと。

2.5. コントロール室

第1期深層掘削のコントロール室よりも監視窓を大きくしたので掘削場内の様子がよくわかるようになった。また監視カメラを掘削ピット底の掘削孔フタ付近が見えるように設置し、ドリルの掘削孔への昇降がコントロール室からわかるようにした。さらに、深層ウインチの稼働状況がコントロール室からは見えづらかったので、監視カメラを増設し、常時コントロール室からモニターできるようにした。

2.6. ドリル作業室

掘削用発電機（28 kVA）の設置・運転とドリル整備・修理のための作業場として第1期深層掘削に引き続き、ドリル作業室を使用した。

3. 深層掘削の情報解析

第2期深層掘削では掘削に関する様々なデータを記録しており、その報告を Motoyama *et al.* (2020) としてまとめているが、この章でも紹介する。なお、深層掘削の経過については、南極 OB 会編集委員会による「南極読本」(2019) のなかに詳しく記載されているので、それを参照してほしい。

3.1. 掘削の進捗状況まとめ

深層掘削の進捗状況を表3に示す。2001年はパイロット孔掘削を行った。掘削深度0 mは第1期掘削の深度を基準とした。深層掘削の1シーズン目から3シーズン目までは平均コア掘削長が3.2 m以上で順調な掘削が出来た。ドリルの最大コア掘削長が3.84 mであるので、2シーズン目は95%、3シーズン目も85%の充足率であった。3シーズン目の1850 m深から2900 m深までは平均3.68 mの掘削であったが、それ以降、次第に1回のコア掘削長が短くなった。1シーズン目から4シーズン目までの氷床表面から3035.22 m深までのコア掘削に費やした掘削回数は1085回、平均コア掘削長が2.80 m、掘削日数は174日であった。

図5に掘削日数と掘削深の関係を示した。3交代とした深層掘削の2シーズン目から掘削速度が上がっていることがわかる。図の右上に標準的な掘削条件を記載した。この条件で計算した掘削速度を実線で示したが、大きなトラブルがなく順調な掘削を2年次と3年次に行えたことがわかる。なお、表3に示した掘削日数には2001年のリーミング作業に要した時間は入っていない。

深層掘削2シーズン目から24時間掘削を行ったこともあり900 m深では1日に50 m以上の掘削ができた。時々トラブルのため掘削長が短くなるが、深さ2000 mを超えても1日30 m程度のコア掘削が可能であった。

なお南極氷床では他にも深層掘削が実施されており、掘削が順調だったシーズンの掘削速

度を比較すると、EPICA Dome Cでは2シーズンの平均で22.6 m/day (180–2871 m 深)、EPICA DMLは3シーズンの平均で18.7 m/day (101–2553 m 深)、WAIS Divideでは4シーズンの平均で22.7 m/day (115–3332 m 深)、第2期ドームふじ深層掘削では3シーズンの平均で22.7 m/day (121–3029 m 深)となり、同じような掘削スピードである。1シーズンでは、第2期ドームふじの2シーズン目における34.6 m/dayが世界最速であった。

表 3 第2期深層掘削の進捗状況。年毎のまとめ。
Table 3. Progress of deep ice core drilling. Summary of seasonal activity.

	deep ice core drilling season	drilling (m)		(m) total	run	(m/run) average	(m/week)	days for drilling		days for staying	
		from	to					days	days		
2001*		(-1.00)	121.47	122.47	177	0.69	122.47	7	11/19-11/25		
2003/2004**	first	121.47	362.31	240.91	75	3.21	73.32	23	12/25-1/16	50	12/5-1/23
2004/2005**	second	362.31	1850.35	1488.04	406	3.67	242.24	43	12/11-1/22	55	12/1-1/24
2005/2006**	third	1850.35	3028.52	1178.17	362	3.25	133.02	62	11/23-1/23	73	11/17-1/28
2006/2007**	fourth	3028.52	3035.22	6.70	65	0.10	1.20	39	12/19-1/26	49	12/12-1/29
total					1085	2.80	122.15	174			

* shallow drilling for pilot hole, ** deep ice core drilling

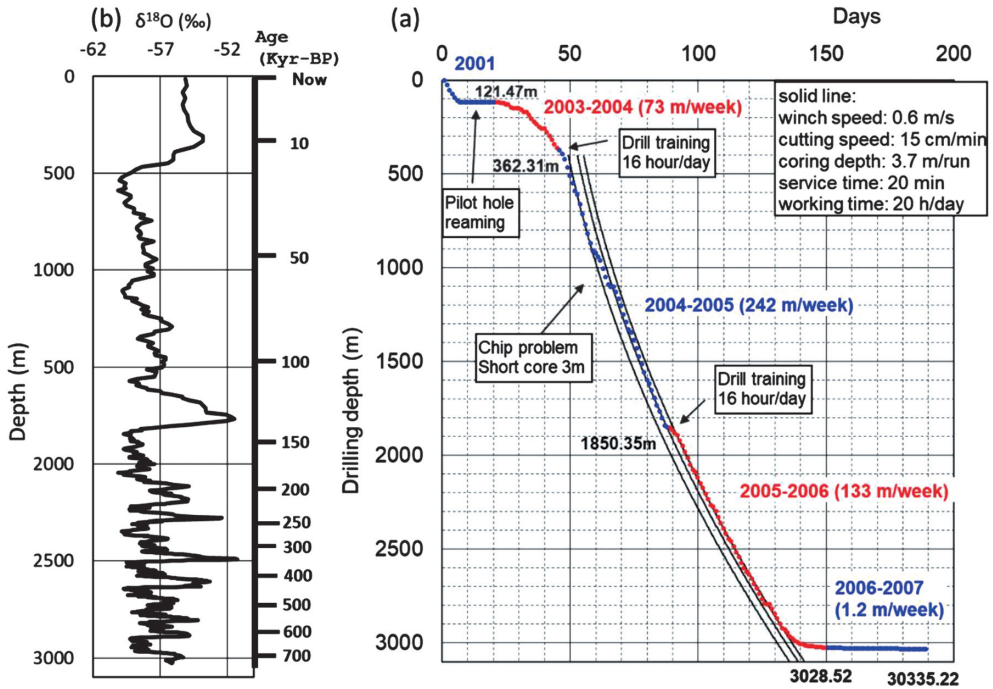


図 5 (a) 深層掘削の進捗状況。(b) コア年代と気温の指標である酸素同位体比 (Uemura et al., 2018).
Fig. 5. (a) Progress of deep ice core drilling. (b) Ice core age and $\delta^{18}O$ of air temperature indicator.

3.2. 掘削情報の詳細

3.2.1. カッター・シュー

カッターは2.1.2.16で説明したすくい角35度 (Type1) と40度 (Type2) の2種類を準備した。氷床の浅層部は氷が低温で硬いのですくい角の小さい35度、深層部は氷温があがって柔らかいのですくい角の大きい40度のカッターをそれぞれ用いた。シューは2 mm (P2) から5 mm (P5) の切削ピッチ用を準備した。改良型ドリルの性能を発揮させるためには切削チップを大きくしたいが切削トルクとのバランスで主に4 mm ピッチのシュー (P4) を使い、掘削状況に応じてピッチを小さくした。

3.2.2. 減速機、コアバレル回転数

定格4000 rpm のモーター回転数を減速させるハーモニック減速機は1/50, 1/80, 1/100 を準備した。深層掘削の1年次に、浅層掘削と同様にコアバレル回転数を80 rpm とするため1/50 減速機を用いたが、氷が硬すぎて氷を切削するトルクが足りないため、うまく掘削できなかった。1/80 減速機に交換しコアバレルの回転速度を50-60 rpm に調整したら正常なコア掘削が可能になり、この仕様で深さ2171 m 深まで掘削した。2171 m 以深は1/100 の減速機を取り付けて定格近くまでドリルモーターの回転数をあげ、十分なトルクで軽く掘削した (表4)。

表4 ドリルモーター減速機の変更履歴。
Table 4. Change history of drill motor reduction gear.

深さ(m)	減速機の減速比	掘削番号(run number)
121.40-151.77	1/50	1-16
151.77-2171.05	1/80	17-574
2141.05-3019.48	1/100	575-833
3019.48-3028.52	1/80	834-851
3028.52-3035.22	1/100	852-916

3.2.3. ドリルモーター電流、電圧

氷コアを掘削中のドリルモーター電流値を図6(a)に示す。ドリルモーターの仕様は入力200 VDC で定格出力500 W, 定格回転数4000 rpm である。モーター能力の許容を考慮して、3.7 A で警報発令、4.2 A でモーター停止の設定とした。150 m 深から700 m 深までは電流値が単調増加している。氷温は上昇していくが氷中の気泡が圧力でどんどんつぶれていく深さであり、氷が硬くなっていくためであろう。それ以降2000 m 深までは電流値が大きくばらついた。すくい角35度よりも40度のカッターの方が効率の良い切削が可能であるので、ドリルモーター電流値は小さくなった。2171 m 深で減速機を1/80 から1/100 に変えたが、氷が柔らかくなったこともあり次第に電流値が小さくなった。2900 m 深以降で電流値が再上昇したのは、切削チップの輸送が困難になったためであろう。

ドリルモーター電圧については、1850 m 深までは地上からの供給電圧、1850 m 以深は実

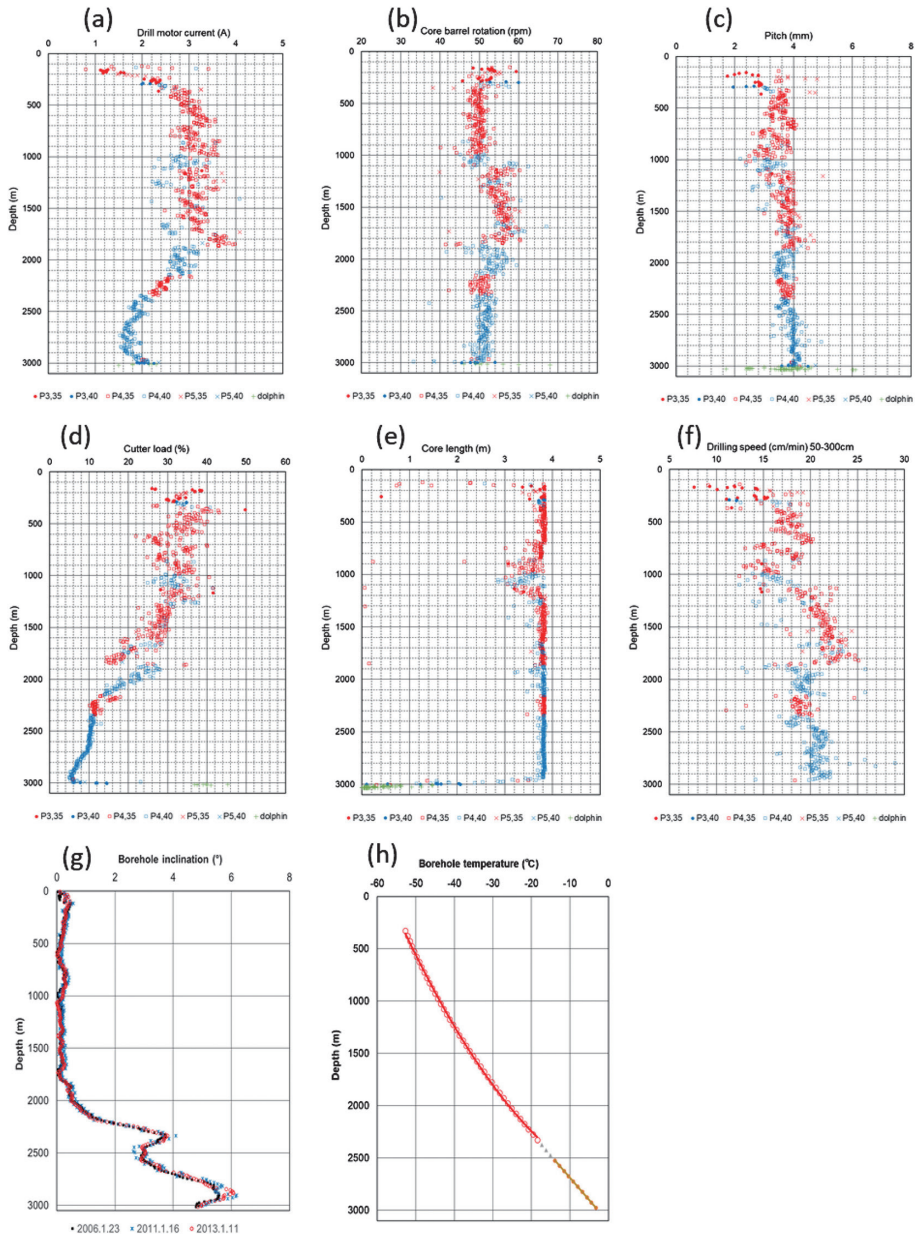


図 6 (a)-(f) 氷コア掘削時の掘削情報. カッターとシュアの組み合わせでマークと色を変えた. P3: 切削ピッチ 3mm 用のシュア, P4: 切削ピッチ 4 mm 用のシュア, P5: 切削ピッチ 5 mm 用のシュア, 35: カッターのすくい角 35 度, 40: カッターのすくい角 40 度, dolphin: ショートドリル. (a) ドリルモーター電流, (b) コアバレルの回転速度, (c) 切削ピッチ, (d) カッターの接地圧, (e) 採取したコアの長さ, (f) コア掘削速度, (g) 掘削孔の傾斜 (10m 平均), (h) 掘削孔の液温分布 (50 m 平均).

Fig. 6. Cutting information during ice core drilling and borehole condition. (a) Drill motor current, (b) Core barrel rotation speed, (c) Cutting pitch, (d) Cutter load, (e) Core length per run, (f) Ice core drilling speed, (g) Borehole inclination, (h) Borehole temperature.

際にモーターにかかっている電圧をモニターした(Motoyama *et al.*, 2020). 地上の供給電圧は、深くなるにつれて単調増加している。コアバレル回転速度や電流値にはこのような顕著な変化は見られない。ドリルモーターへの供給電力については、ウインチケーブルの外被をグラウンドとして使っているため、ウインチドラムに巻いているとグラウンドがショートした状態であり、延ばすとケーブル抵抗が大きくなり、供給電圧を大きくする必要があった、ということが考えられる。2171 m 以深では減速機を交換してトルクが優る定格に近い電圧 200 V でドリルモーターを回した。

3.2.4. コアバレル回転速度

コアバレル回転速度を図 6(b) に示した。コアバレル回転速度については、50–60 rpm を基本とした。1000 m 深を超えてから回転速度を高めてみたが、掘削の効率が上がった様子にはなかった。2171 m 以深は減速機を 1/80 から 1/100 に変えて、モーター回転速度を速くし、50 rpm 前後での掘削を行った。

3.2.5. 切削ピッチ

掘削した氷コアの表面で実測した切削ピッチを図 6(c) に示す。初年度は掘削最適条件を求めため P3 や P5 のシューも使ったが、P4 のシューで安定した掘削ができた。そのため、ほとんどの掘削でシューとして切削ピッチ 4 mm 用の P4 を取り付けた。表層部から 1500 m 深までは切削ピッチが 3 mm から 4 mm までばらつくが、1500 m 以深はほぼ切削ピッチ 4 mm で安定した掘削ができたことがわかる。

3.2.6. 接地圧

ドリルを吊り下げているバネの長さ変化を差動トランスでモニターすることで、氷に対する刃先荷重(接地圧)を知ることが出来る。この接地圧を図 6(d) に示す。ドリルの全荷重を 100 % として接地圧を表している。鉛直に掘削することが望ましく、そのためには接地圧を出来るだけ軽くして掘削する必要があるが、2.1.3.2. で述べたように接地圧が軽すぎるとカッターが氷に食い込まずにスリップしてしまう。図 6(d) は氷コア掘削中の平均接地圧で、深くなるにつれて氷温度が上昇し、氷が軟らかくなるため接地圧を軽くしてコア掘削することが可能であった。なお、1850 m 深に接地圧のギャップがあるが、バネの長さを測定している差動トランスのゼロレベルを変更したためだと思われる。2700 m 深を超えて 2950 m 深までは接地圧を可能な限り軽くしても掘削可能であったが、2950 m より深くなると接地圧を高くして掘削する必要があった。ドリルを下ろしてカッターの刃先が最初に氷を削り出すときの接地圧は、氷コア掘削中の接地圧よりは大きな刃先荷重となる。2000 m 深を超えてからの記録しかないが、3000 m 深までは次第に軽い接地圧で氷を削り出すが、3000 m 深を超えると高い接地圧が必要であった(Motoyama *et al.*, 2020)。氷の温度が圧力融解温度に近いいため、切削チップがカッターマウントの周りやチップ室への輸送途中で、すぐに圧密氷化してしまうためであろう。

3.2.7. ケーブル張力

3.2.7.1. ドリル掘削時のケーブル張力

マスト頂部のシーブに取り付けたロードセルでコア掘削直前のケーブル張力を測定した。液中のドリルとウインチケーブルを合わせた荷重に相当する。深くなるにつれて単調増加している。

3.2.7.2. コアブレイクに必要な正味の張力

コアブレイクのときの最大ケーブル張力から、掘削開始直前のケーブル張力を引いた値が、コアブレイクに必要な正味の張力である。深さ 500 m から 1850 m までは 200~400 kg、2200 m 以深は 100~300 kg であった。3000 m を超えると正味のコアブレイク張力が 1 トン近くになったこともある。氷の単結晶の大きさが 50 cm を超えることもあり、単結晶の途中でコアをブレイクするのに大きな張力が必要なことも理由の一つであろう。

3.2.8. 1 run 毎のコア長

一連の掘削作業について「run」と呼ぶことが多いので、本報告でも「run」を用いることとする。1 run 毎のコア長を図 6(e) に示すが、1000 m 深前後を除いてほとんどの run で、コアバレルに収納可能な最大掘削長まで水コアが掘削できた。深さ 800 m から 1200 m までは、切削チップがチップ室に均等に入らなく硬詰まりすることでチップ輸送が困難になったため、コア長が短くなった。ブースターの種類や取り付け位置、切削ピッチを変えても状況に変化は見られなかった。ちょうど、水中の気泡がクラスレートに変化する深さに相当し、それが影響したのであろうか。2950 m 以深は、氷温が高くなり、カッターマウントやチップ輸送の途中でチップが圧密氷化しやすくなり、チップ輸送を阻害するため、掘削したコア長は次第に短くなった。温度条件だと、液温が -4°C より高くなる深さから次第に掘削が困難になった。氷床の底面近くは圧力融解温度 -2°C に達していて、ほとんど掘削できなくなった。カッターの接地圧による氷の圧力融解や回転するカッターと氷の間の摩擦熱で生じた融解水が再凍結することでカッターマウントからの切削チップの輸送が不可能になるためであろう。

3.2.9. 掘削速度

長さ 0.5 m から 3.0 m までコア掘削しているときの平均掘削速度を図 6(f) にまとめた。切削ピッチを決めるシューとして主に P4 を使ったので、コアバレルの回転速度とウインチ繰り出し速度で掘削速度が決まるはずであるが、ばらついている。深さ 1100 m から 1850 m まではコアバレル回転速度を次第に速くしているので、掘削速度も速くなった。2500 m 以深は小さい接地圧でウインチ繰り出し速度と掘削速度が同調した理想的な掘削となった。約 4 m の氷コアを 20 分から 25 分で掘削した。

3.2.10. コアトップのチップ

地上でコアバレルから氷コアを取り出すときに、コアトップにチップが載っていることが

ある。チップの厚さ分、最大コア長が短くなるので、無いことが望ましい。3000 m までは特に理由なくチップがコアトップに残っていた。3000 m 以深での掘削では、再凍結した氷であろうと思われるチップが多量にコアとともに回収された。

3.2.11. ドリル下降時間と下降速度

自然落下に近い速さでドリルを掘削孔に降下させるが、ケーブルが緩まない範囲で、なるべく速くウインチを繰り出す。ドリルを吊り下げているバネの長さ変化で示される接地圧をケーブル緩みのあるなしの判断材料とする。接地圧が大きくなるとケーブルテンションが軽くなり、ケーブルが緩む傾向になるので、ウインチスピードを緩める。3000 m の距離を下すのに2時間近くかかる。ドリル下降速度は平均0.4~0.5m/sであった。このスピードを維持するためにはウインチドラムの巻段が下がるにつれてウインチモーターのスピードを上げる必要がある。

3.2.12. ドリル上昇時間と上昇速度

掘削終了後、ドリルを地上に引っ張り上げる速度は、ウインチの能力によることが大きい。ウインチモーターの電流やケーブル張力に注意しながらウインチモーターの回転速度を調整する。ウインチドラムでケーブルを巻いていくが、巻段が増すと同じウインチモーターの回転速度でも上昇速度は速くなる。1000 m 深までの掘削では、安全で最適な上昇速度を見つけるために、次第に速くした。その結果、1000 m 以深の掘削では、ドリル引き上げ速度を最大0.8-0.9 m/s で調整することにした。

3.2.13. 地上作業時間

ドリルを地上に回収して地上での作業後、再び掘削孔に下すまでに必要な時間は、15分から30分であった。切削チップが均等にチップ室に収まり、氷コアが複数に割れていないと作業は速かった。

3.2.14. 1 run あたりの作業時間

ドリルを掘削孔に下してコア掘削し、地上にドリルを回収して地上作業を終えて再びドリルを下すまでの1 run にかかる平均的な時間は、1000 m 深で110分、2000 m 深で170分、3000 m 深では230分であった。

3.2.15. 掘削孔の状態

掘削孔の10 m 平均の傾斜を図6(g)に示す。これらは深層ドリルや検層装置に付けた傾斜計での測定した。2000 m 深まではほぼ鉛直であるが、2000 m 深を超えると傾斜が大きくなる。2370 m 深で3.7度まで傾き2500 m 深までは3度まで鉛直に戻り、そこから2860 m 深まで最大6度の傾きになるが、また鉛直方向の5度まで戻った。第1期掘削孔の傾斜記録を見ると2500 m 深まで同様な傾斜変化をしているので、氷床内部の構造により、掘削機が進みやすい方向があるらしい。図6(h)に掘削孔の50 m 平均の液温を示す。深さ500 m までは-50℃以下であるが、深さとともに液温が上がり、掘削孔底では圧力融解温度の-2.0

℃であった。この温度分布は、深さ 2300 m までは二次式、2500 m 以深は一次式で近似できる。

3.3. チップ回収とベイラー

3.3.1. チップ回収

コア掘削する際に発生する切削チップは、液封液とともに輸送されてチップ室に回収されるが、輸送されずに取りこぼした切削チップが液封液中に残ってしまう場合がある。液封液中に多くの切削チップが残るとコア掘削の障害やドリルスタックの原因になるため、液中の切削チップを回収する必要がある。そのため、2.3.1. で説明したチップ回収器で液中の切削チップを濾し取る。掘削深毎の掘削孔に残っている推定チップ重量と 1 run 毎にドリルで回収したチップ重量を比較した。ドリルで回収したチップ重量とカッターで切削した推定チップ重量を比較したところ、ほぼ取りこぼしがなく、ドリルの昇降にも問題なかったため、全期間を通じてのチップ回収 run は 13 回のみ実施した。チップ回収器で回収した全シーズンの総氷チップ量は 110kg であった。

なお、地上に回収した切削チップは液封液を多量に含んでおり、脱水機にて切削チップと液を分離するが、完全には分離できない。脱水後の切削チップに含まれる液封液の割合を測定した。1 シーズン目は 15 %、2 シーズン目は 10 %、3 シーズン目と 4 シーズン目は 5 % であった。後半の方が液の割合が減っているが、掘削のインターバルが掘削深度が深くなるにつれて長くなり、十分な脱水時間をかけられるようになったことと、小分けにして脱水機に入れることで脱水効率がよくなったためである。概ね、1 回の掘削で 25 kg の切削チップを回収した。図をみると掘削孔に残る推定チップ量は小さく、ほとんど回収できている。ただし、3000 m 以深はその run で切削したチップ以上の量が回収されるようになった。氷床底面から掘削孔内に入ってきた水が再凍結したためであろう。

3.3.2. ベイラー

掘削深度が 3000 m 深を超えると液温（氷温）が -2°C 程に上昇するため、氷の密度と液の密度がほぼ同じになり、切削チップが沈むようになる。これが原因で深部のコア掘削が不調になったとも考えられたので、高密度液をベイラーに詰めて掘削孔底部へ注入することとした。しかし、高密度液を入れてベイラーを鉛直に立てると、高密度液が下のパッキンから漏れ出してしまうので高密度液注入は中止した。ドームふじ基地では補修する材料がなく、ベイラーは国内に持ち帰った。

3.4. 液封液の注入とチップ等からの液封液の回収

3.4.1. 液封液

液封液（酢酸ブチル）は、液面が 130 m 深付近を維持するように 200 L 単位で注入した。切削チップとともに地上に上がってきた液も回収して適宜掘削孔へ戻した。液封液の消費量

は 55280 L であった。掘削孔に残っている液封液は、直径 135 mm の孔を 130 m 深から 3035 m 深まで満たしているため、41560 L となる。両者の差である 13720 L が液封液の損失となり、割合では 25 % であった。

3.4.2. 切削チップ等からの液封液回収

液封液まみれのチップを脱水機にかけて液封液を回収した。ドリルを引き上げるときにケーブル表面に液が付着して地上に引き上げられる。これがマスト頂部のシーブのところで扱かれて雨のように落ちてくる。また、ウインチドラムに巻かれながら液が滴り落ちる。これらは掘削場の臭気の原因になり、液封液の損失にもなる。そのため、ウインチケーブルが地上に出てくるところに毛布を巻いて扱くことで掘削孔に液を戻し、マストとウインチの間にはブラシと樋を置き、液を回収した。ウインチにはパンを敷いて滴り落ちる液を溜めた。ドリルを引き上げた時にドリルから滴り落ちる液やドリルを洗浄するときの液は、そのまま掘削ピット斜坑の樋に落ちて、自動的に掘削孔へ注ぎ込んだ。

3.5. コアの現場処理と貯蔵

地上に回収したコアは、コアパレルから作業台の樋に押し出した。コア深度が記載されている前回処理したコアと切断面を合わせて、深さ 50 cm 毎にマーキングし、コア上面に深さ方向へ直線を引いた。またコアの断面には位置合わせ用に 1 本線や 2 本線などを引いておいた。マジックは滲むため使用不可で、鉛筆で記載した。また切削ピッチとコア径を測定した。計測後、コア長 1.5m 単位でコアを切断し、 -50°C 以下の雪洞に設置したコア一次デポ棚で保管した。このコアは随時運び出され、コア現場解析後にコア長 50 cm で切断し、雪を詰めたダンボール箱に収納して -50°C 以下の最終貯蔵庫に保存し、計画的に国内へ輸送した。

3.6. ドリル点検と調整

3.6.1. カッターとコアキャッチャー

朝の始業時に、ドリル各所のボルト点検を行った。カッターについては毎回刃先をチェックした。コアキャッチャーは刃先とバネの強さを毎回チェックした。カッターは刃先に傷や摩耗があると研磨して再利用した。再研磨のカッターは高さが微妙に異なるので、カッター治具台にて 3 枚のカッターの高さが一致するように、カッターマウントとカッターの間に 0.01 mm 単位でスペーサーを挟んで調整した。研磨して再利用したカッターも入れると全部で 178 組使った。1 組のカッターで平均 5.1 run、16 m 長のコアを掘削した。3 シーズン目は氷が柔らかくなったためか、1 組で平均 7.1 run、23 m のコア掘削に使用できた。優秀なカッターだと 18 run で 67 m のコアが同じ 1 組のカッターで連続掘削できた。

3.6.2. ブースタースクリュウ

ブースターは (A) 100 mm1 巻、(B) 50 mm1 巻、(C) 50 mm 3/4 巻を準備した。100 mm1

巻とは、厚さ 100 mm でスクリーが一巻という意味である。コア掘削や切削チップの充填状況を見ながら、試行錯誤で最適な配置を決めた。900 m 深までの掘削では、ドライブシャフト（全長 5453 mm）下端の逆流防止弁位置を 0 とすれば、0 m、1.8 m、3.6 m に (B) を取り付けた。900 m 深からの掘削では、コア表面が波状に削れたり、チップがチップ室に均一に入らなかったり、最下部にたまらなかったりで、掘削できたコア長が短くなった。1270 m 深以降は再び順調な掘削となり、0 m に (B)、1.35 m あるいは 1.0 m に (C)、2.7 m あるいは 3.0 m に同じく (C) を取り付け、3006 m 深まで掘り進んだ。3006 m 深からシャフト長が 3.16 m のショートドリルに交換した。最初は 0 m と 1.55 m に (B) を取り付けたが、掘削できたコア長が短いので、中央部は取り外して、0 m に (B) を 1 個のみ取り付けた。しかし掘削できるコア長に変化はなかった。

3.6.3. 逆流防止弁

逆流防止弁をコアバレルの上端に設置して、ジャケットとコアバレルの隙間を開閉可能とした。ドリルを下すときには弁を開き、ドリル内の流路を確保して下降速度を少しでも速くした。ドリルを上げるときには、ドリルモーターを逆転して弁を閉じ、チップ室からチップが流れ出るのを防いだ。弁の板厚が薄く、変形することが多かったので、板厚を厚くした。

3.7. 掘削状況の詳細

ドリルやウインチには複数のセンサーが付けられており、掘削情報をモニターして記録している。それを元に、掘削状況の詳細をまとめて報告する。図 7 および図 8 に示した共通する項目としては、掘削深度、ドリルモーターの電流、接地圧、コアバレル回転速度、ドリルモーター消費電力、ドリルモーターへの地上からの供給電圧である。

コア掘削の手順を説明する。ドリルを下ろして孔底から 5-10 cm 上で停止し、コアバレルを 50-60 rpm で回しながらゆっくりドリルを下す。刃先が着底してもウインチケーブルを繰り出すと接地圧が次第に高くなる。この途中で氷への切削が開始され接地圧が下がる。同時に電流値が上がり、コアバレル回転が遅くなるので、ドリルモーターへの供給電圧をあげてコアバレル回転速度を 50-60 rpm に維持する。コア掘削中はケーブル繰り出し速度を調整し、接地圧を低く保ちつつ掘削を進める。切削チップがコアバレルの周囲やチップ室に充填してくると、ドリルモーターの電流値は少しずつ上昇する。切削チップが充填してドリルモーター電流値が 3 A 以上になったとき、あるいは掘削したコアでコアバレルが満杯になり刃先がスリップし電流値が下がったときにそれ以上の掘削が不可のため、コア掘削終了とする。ドリルをゆっくり引き上げ、接地圧を掘削最初の値まで戻して最終深度をチェックし、逆流防止弁を閉じるためドリルを短時間逆転する。その後、高速でドリルを引き上げてコアカットし、そのまま上昇させる。コアカットに失敗した場合は、コアカットするまで繰り返す。氷コアの掘削状況を 5 例、以下に示す。

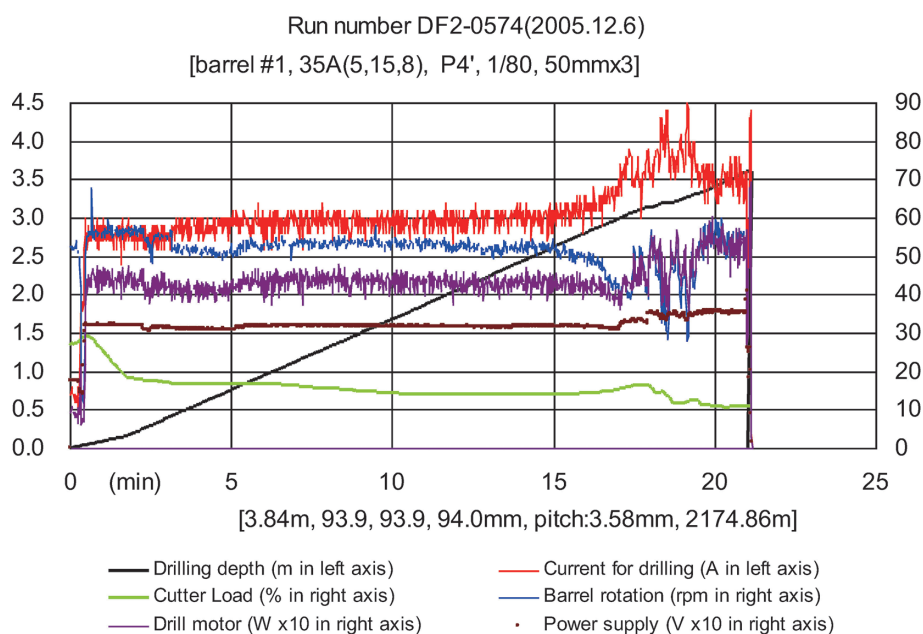


図7 海水コア掘削の一例。チップ詰まりによるドリル電流上昇で掘削終了。経過は本文を参照。
Fig. 7. Example of ice core drilling record. Drilling with an abnormally high drill motor current.

3.7.1. ドリル電流が異常に上昇した場合

ドリル電流が異常に上昇してコア掘削を終了した状況を図7に示す。前半は、モーター電流 3A、コアバレル回転速度 55 rpm、接地圧 15%程度で順調にコア掘削を進めた。切削チップの輸送やチップ室での充填に問題があったためか、15分過ぎからモーター電流が急上昇した。バレル回転速度が下がるので地上からの供給電圧を高くして掘削を続けた。21分過ぎに、コアトップがコアバレルの上端にぶつかり、カッターの刃先がスリップしたため掘削を終了した。基準とした設定値よりも高い電流での掘削であったため、ドリルを地上に回収してドリルコンピュータを点検したところ、電子回路の一部が焼けていた。コア長は最大長である 3.84 mであった。

3.7.2. カッターのすくい角を 35 度と 40 度にしたときの違い

カッターのすくい角を 35 度と 40 度にしたときの掘削例を図8 (a)–(b) に示す。コアバレルの回転速度は 50 rpm、接地圧は約 10%と共通で、コア長はそれぞれ 3.83 m と 3.82 m であった。図8(a)のすくい角 35 度の場合、ドリルモーター電流が 2.5 A、消費電力が 450 Wであったが、図8(b)のすくい角 40 度ではそれぞれ 1.7 A、300 Wとどちらも低い。しかし掘削されたコアの表面状態は異なり、すくい角 35 度のカッターで掘削したコアの表面は鏡状で、40 度で掘削したコアの表面はすりガラス状になっていた。なお、図8(a)ではコア掘削を終了してからコアカットし、そのあとでコアバレルを回している。これは、コアバ

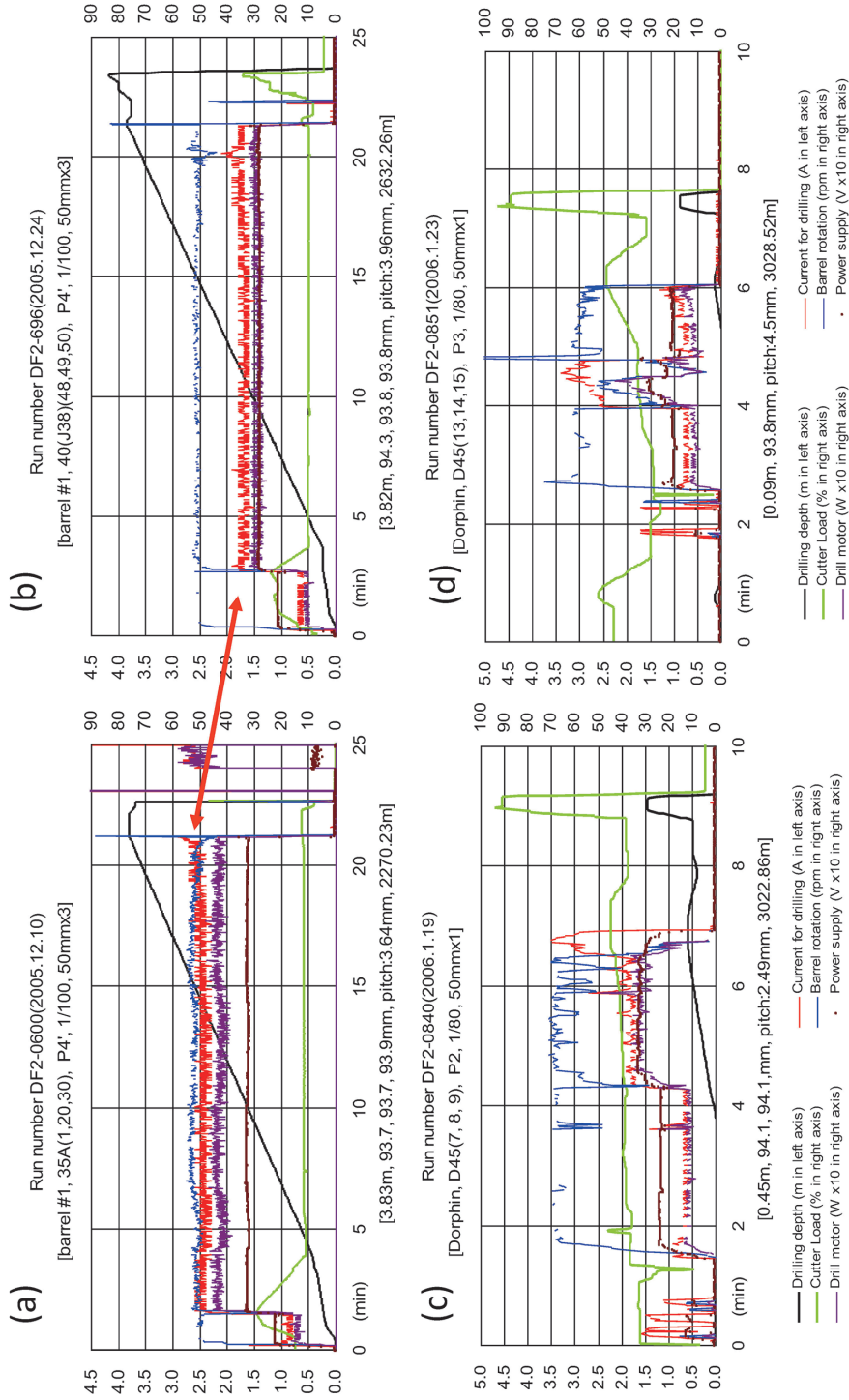


図 8 水コア掘削の一例。(a)-(b) カッターのすくい角の違いによる消費電流の変化。(a) すくい角 35 度。(b) すくい角 40 度。

(c)-(d) 氷床底部掘削用ショートドリルでの掘削例。経過は本文を参照。

Fig. 8. Examples of ice core drilling record. (a) rake angle of 35°, (b) rake angle of 40°, (c) and (d) a short drill used for warm ice.

ルとジャケットの間のチップがドリル引き上げ時に落ちやすいため、孔底付近に取りこぼしたチップがあり、これらの切削チップをチップ室へ回収するために空転させたことによる。図8(b)ではコア掘削終了後にドリルを下して接地圧を上げているが、これは掘削を開始した接地圧と同じ接地圧の深度を最終深度としたためである。

3.7.3. ショートドリル（氷床底部ドリル）での run - 高電流で終了 -

ショートドリルでの run において、ドリル電流値が3 A 以上に上昇したため掘削を終了した例を図8(c)に示す。ショートドリルについては2.1.4.を参照のこと。カッターが最初に氷へ食いつくまで時間がかかった。食いついてから2分半掘削が継続したが、電流値が急激に上昇したため、掘削を終了した。カッターマウントやコアバレルのアルキメディアンポンプ用スパイラルの途中で切削チップが圧密して高密度化したためコアバレルの回転に対して大きな抵抗になったためであろう。コアバレルの逆転は不可であったがコアカットは順調にでき、45 cm のコアを採取した。

3.7.4. ショートドリルでの run - 刃先スリップで終了 -

ショートドリルで、カッターの刃先がスリップしたために掘削終了した例を図8(d)に示す。3シーズン目の最後の run で9 cm のコアが採取出来た。カッターの刃先がなかなか氷に食いつかず、食いついてからのコア掘削は1分も続かず、高めの電流値がカッターの刃先がスリップしたため急低下した。そのまま刃が氷に食いつくのを待つが状況に変化がなく、掘削終了としてコアカットした。

4. 主要トラブルとその対策

主要トラブルとその対策について表5にまとめた。ドリル本体、ウインチとケーブル、マスト、モニターとコンピュータ、異物落下、掘削孔収縮、氷床底部の温暖氷掘削、チップ回収器とベイラーにわけてそれぞれ紹介する。

4.1. ドリル本体

ドリル本体に関するトラブルとしては、(1) アンチトルク部：リーフスプリング、スリップリング、差動トランス、(2) 耐圧室：浸水、面シール、耐圧電気端子、センサー類、コンピュータ、ドリルモーター、減速機、ベアリング、(3) チップチャンバー、ジャケットパイプ、(4) ワンタッチジョイント、ドライブシャフト、ブースター、逆流防止弁、スパーバンガー、(5) コアバレル、カッターマウント、カッター、シュー、コアキャッチャーなどに関するものがある。また、(6) コア掘削に伴うトラブル、(7) チップ輸送・チップ収納に関するトラブルも多々あった。主なものを紹介する。

4.1.1. スリップリング

深層掘削4シーズン目の深さ3028 m から3035 m までの掘削の時に、ドリル本体のスリッ

表 5 各種トラブルとその対応一覧.

Table 5. Various troubles and the corresponding list.

場所	内容	回数	対策
ドリル各部	アンチトルクがへたり、ドリルがスリップしたと思われる	2回	交換
	逆流防止弁が変形	3回	板厚を厚くする
	コアバレルジョイントスプリングピン破損	1回	交換
	ジャケット切り先を調整	2回	チップが入りやすいように拡張
ドリルモーター・減速器	減速器に異音	1回	交換
	ドリルモーター回転せず調査	4回	交換
カッター・コアキャッチャ	コアキャッチャが水平まで倒れてコア破損	250m以降	カッターマウントに1.5mm高のビスを埋め込んで倒れ防止とした
耐圧室	浸水	4回	浸水の原因調査後、乾燥
	コンピューター用レールの長さが微妙に異なり、コネクタの接触不良	1回	調整
	耐圧室のスラストベアリング破損	1回	交換
	シャフトシール交換	3回	交換
	耐圧電線コネクタ断線	2回	交換
コンピュータ	通信不調	14回	調整
	スリップリングショート交換	15回	修理、交換
	中継コンピュータヒューズ破損	20本以上	修理、交換
	各所配線断線・ショート破損	多数	修理
	コンピュータポート不調の疑い	多数	交換
	中継コンピュータ要冷却	1回	ファンを稼働
	中継コンピュータトランスが焼ける	1回	交換
操作盤	ウインチインバータ暴走	2回	インバータ冷却
	ドリル電源用コンデンサ発煙	1回	交換
	電圧調整器コンデンサ3個焼ける	1回	交換
	ドリル正逆転スイッチ癒着	1回	交換
ウインチ・ケーブル	ケーブルキック：80mでとぐる巻く。110m、150m、180mで損傷	1回	200mケーブル切断
	ドリルミニスタック(3024m)	1回	1.5tonの張力で3.5時間。
	ケーブル交換(3034m)	1回	
	エンコーダーシリコンチューブスリップ	1回	シリコンチューブ交換
	ケーブル長メカニカルカウンター不調	常時	適宜点検
	ケーブル内芯断線・ショート(最後は7芯のうち4芯使用不可)	3029m以降	結線変更
	ケーブルグリップ上部で導線がへたる	1回	ケーブルグリップ交換
フィッシング	コアキャッチャ、ボルト、スプリングピン、イモビス	6回	強力磁石シューで回収
ドリル昇降	ケーシング上端蓋をひっかける	2回	再設置
	ケーシングパンをひっかける	3回	再設置
	上昇時、ケーシング下端で微速	常時	引っかかったの破損防止のため
	液封液防止で上昇時に毛布かけ	常時	液封液損失防止のため
周辺機器	ハンドウインチのラッチェット爪破損	1回	交換
	プチルポンプのOリング損傷	1回	交換
	ペイラー液漏れ(3029mで実施)	1回	調整不可
チップ	チップ高密度バックで引き抜き困難	2回	1-2時間放置し、チップ室から液が流れ出るのを待って引き抜く。

プリングを15回交換した(図9)。地上からドリルを氷床底面近くまで下ろすと、スリップリングでショートが発生したためである。電極を見ると、黒い粉が固まっていた。3シーズン目で3028 m深の掘削が終了してから4シーズン目の掘削を開始するまで11か月間あり、電解質を含む氷床底面の水が混入したためであろう。スリップリングが頻繁にショートしたため、修理して再利用した。また、ショートした時に中継コンピュータのヒューズが飛んでしまい、持ち込んだ予備品が不足したのでヒューズも再生した。

4.1.2. 耐圧室

耐圧室に液封液が4回浸水した。1回は耐圧電気コネクタが損傷したためだったが、3回は原因不明であった。

4.1.3. 配線

耐圧室で使用しているコネクタから電線が抜けることによる断線、耐圧室を組み立てるときに電線を挟んでしまうことによる断線、過電流によるショートが頻繁に起こった。

4.1.4. ベアリング破損



図9 スリップリングのショート。

Fig. 9. Short circuit of the slip ring.

耐圧室のスラストベアリングが破損したので交換した（図 10）。原因不明であった。

4.1.5. シャフトシール破損

耐圧室のシャフトシールが破損したので交換した。原因不明であった。

4.1.6. 減速機

コアバレルの回転が速い方がコア掘削速度やチップ輸送に有利であるので、1シーズン目の深層掘削では1/50の減速機を最初に使用したが、 -50°C 以下の硬い氷への切削トルクが足りなく、掘削不調なため151 m深以降から1/80の減速機を使用した。2171 m以深では、さらにトルクが必要となったので、1/100の減速機に変更して掘削した。

4.1.7. ブースター

759 m深からチップ室へ輸送される切削チップが持ち上げられる圧力に負けて、止めネジ（通称、イモネジ）で固定されているブースターが上方に押されて移動するようになった。しかし、ブースターが移動することで切削チップがチップ室へ均等に充填されるので、望ましい結果となった。ブースターは設計では50 mm幅と100 mm幅で1巻としたが、50 mm幅の3/4巻を試しに持ち込んでいた。この3/4巻を使用したところ、思いがけずチップ充填がうまくいった。そこで逆流防止弁の直上に50 mm幅の1巻、それより上方に2個、あるいは1個の50 mm幅の3/4巻を、切削チップが均一に充填するように取り付けた。

4.1.8 逆流防止弁

ドリル下降時には弁を開けて液の流路を確保し、上昇時には弁を閉じてチップがチップ室から流れ出るのを防ぐ逆流防止弁を取り付けた。使い始めると、材料の強度が足りなかつたので、部材を厚くし、板バネを加工して強く外へ押し出すようにした。深さ1920 mを超えると、逆流防止弁に切削チップの圧密氷が形成されるようになったので、弁を削って切削チッ



図 10 スラストベアリング破損.

Fig. 10. Broken of bearing.

プの逃げ場をつくった。なお、コア掘削終了後にドリルモーターを逆回転して逆流防止弁を閉じるが、これを忘れるとチップ室から切削チップがすべて掘削孔内に流れ出す。次の掘削のときに前回に流出した切削チップが加わることでチップ室が速く充填され、掘削可能なコア長が短くなる原因となる。

4.1.9. コアキャッチャー

深さ 260 m の掘削において、取り付けられたコアキャッチャーがコア掘削直前に 2 枚とも水平に倒れたまま固定されたようになり、この状態でコア上端を砕いていた。地上で回収したコアは、上端から 4 cm までは直径 75.6 mm、その下が 87.6 mm となっていた。このようにコアキャッチャーが傾いたときに固定されてしまうのを防止するため、カッターマウントのコアキャッチャーを取り付けるスペースの底面に、1.5 mm 高のビスを埋め込んで、倒れても斜めで止まるようにした。コアブレイクやドリル上昇時のコア落下防止には支障はなかった。

4.1.10. カッター

刃先が損傷した場合、その程度がひどくなければ砥石で研磨して再使用した。この時に、刃先高が変化するので、カッター調整治具にカッターを 3 枚セットして、その高さを隙間ゲージを挟んで 0.01 mm 単位で調整した。平均すると 1 シーズン目が 14 m、2 シーズン目が 17 m、3 シーズン目が 25 m のコア掘削でカッターを交換した。持ち込んだカッター 1 枚の平均コア掘削長は研磨した再利用も含めて 60 m であった。

4.1.11. ボトムコア

コア掘削終了後、ドリルを引き上げるとコアキャッチャーが氷コア表面から食い込み、くさびを打ち込むように氷が折れる。折れて離れたコアは、倒れたコアキャッチャーに支えられてドリルとともに引き上げられて、地上に回収される。コアキャッチャーの効きが悪いと、コアにコアキャッチャーが食い込んだままコアが折れない場合がある。この場合、ボトムコアといって、掘削したコア底面からコアをもぎ取るようにしてコアが回収されることがある。コアキャッチャーの食い込み位置よりも深くから、場合によってはコア径よりも大きな氷がはみ出た形でコアが回収されることがあり、ボトムコアであることがわかる。コアを氷床本体からもぎ取るには大きな張力が必要で、場合によってはドリルがスタックする危険がある。コアキャッチャーによるコアカットが望ましいので、コアキャッチャーの刃先をシャープに保つことと、押しばねのメンテナンスに心がけた。

4.1.12. コアの取り残し

コアカットの時にコアが途中で割れて掘削孔の底にコアが残置されてしまうことがある。次の掘削でコアバレル内にすんなり入って掘削が行われることが通常であるが、残ったコアが短く割れていると、カッターマウントに斜めに入り込むことがある。ある run ではコア掘削を開始するためコアバレルを回して接地圧を大きくしてもカッターの刃先が氷に食い込まず、コア掘削を諦めて地上にドリルを回収したところ、カッターマウントに氷コアが斜めに

はまっていたことがあった。このように、いつもと違うことがあれば、地上にドリルを回収して確認することが必要である。

4.1.13. 切削チップのチップ室への充填

切削チップの輸送が順調で、チップ室にバランスよくチップが充填されると、地上にドリルを回収してコアバレルとドライブシャフトを抜くと、すべてのチップが引き出され、ジャケット内部にはほとんどチップは残らなかった。切削ピッチが約4 mmで比較的大きなチップのため、チップ室にあけた多数の小孔のフィルタによる液封液の濾しと、移動するブースターによる均一な充填が有効に働いたためであろう。

4.1.14. 切削チップのチップ室からの流出

掘削深が深さ800 mから1200 mまではチップがチップ室に均等に入らなく硬詰まりするようになった。そのためrun毎のコア長が3.0-3.8 mと短くなった。逆流防止弁は正常に働いていたが、チップ室の下方に設置したブースター間のチップが流れ出ることが多かった。ドライブシャフトにロープやシートを巻いて、チップの流出を防ごうとしたが効果がなかった。4.2.9.でも説明しているが、氷中の気泡がグラスレートに変化する深さのコア掘削には、さらなる検討や工夫が必要である。

4.1.15. 温暖氷のチップ固結トラブル

掘削深が3000 mより深くなると、融点付近の温暖氷のため、掘削中に発生した切削チップがコアバレルとジャケットパイプの間をスムーズに輸送されず、カッターマウントの輸送路に硬く固まってしまう。こうなると、刃先が氷に食い込まないため掘削が継続不能で、数cmから数10 cmまでの掘削で終了となった。また、切削チップがチップ室まで運ばれたとしても、融点付近の温度であるため、チップ室の入り口で高速圧密されやすく、チップ輸送を阻害することとなった。

4.1.16. ミニスタック

3000 m深を超えるコア掘削ではコア長が短く、単結晶の途中でのコアブレイクに大きな張力が必要になった。3024 m深でスタックしたが、ケーブル張力1500 kg（コアブレイクの正味の張力900 kg）をかけて3時間30分後に、コアが変形しながら折れて、コアブレイクすることができた（図11）。

4.2. ウインチとケーブル

ウインチインバーターが暴走してウインチの回転制御がウインチ操作盤から不可になったことが2回あった。このときは、インバーターが収納されているケース内部の温度が50℃を超えていた。ウインチインバーターの温度環境を管理することにし、頻繁にウインチを動かす場合には、保温用の毛布を取り、ケースの扉を少し開けて外気を取り入れて冷やすこととした。

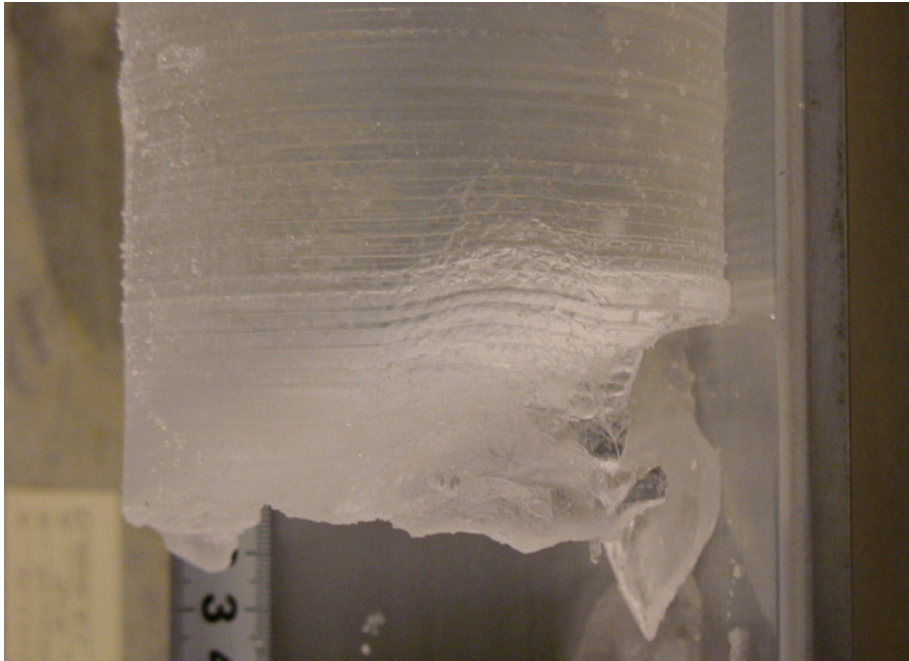


図 11 スタックして3時間30分後に回収したコア.

Fig. 11. Stacked ice core.

地上からドリルを下ろすためにウインチケーブルを繰り出すが、ドリルの落下速度よりもケーブルの繰り出し速度が速いと、ケーブルがゆるんだり、キンクが発生する原因となる。これを防止するため、ドリル落下時の液抵抗の指標である接地圧が設定値を超えると自動停止する機能を使ってみたが、頻繁に急停止してドリルやケーブルが暴れたため、接地圧による自動制御を中止した。手動で適正な接地圧になるようウインチケーブル繰り出し速度を調整した。

610 m 深での掘削中、ドリルを下すときにウインチケーブルをドリル落下速度より速く繰り出してしまい、ケーブルドラムのケーブルが緩んで乱卷になったので、巻き直した。ドリルを下すときに接地圧の確認が不十分だったのが原因である。

1740 m 深の掘削中、ケーブル長 157 m のところに 2.5 m 程度のケーブルキンク跡を発見し、その2日後にケーブルキンクが発生し、ケーブル長 80 m でとぐろを巻いてしまった(図 12)。ケーブルをチェックしたところケーブル長が 110 m、150 m、180 m の3か所でケーブルが損傷していたので、ケーブルを 200 m 切断してケーブルグリップを付け直した。

ウインチケーブル内には、7本の内芯があり、3本をコンピュータとの通信と電源用に使い、4本をドリルモーター用のプラス電源としてまとめて使っていた。マイナス極(アース)はステンレスで編まれているアーマードケーブルの外被を使った。4シーズン目の掘削では、



図 12 キンクしたワイヤー。

Fig. 12. Kink of wire.

深層ケーブルの内芯の損傷が進んだ。3000 m 深を超えると正味のコアブレイク張力が1トン近くになったこともあり、ケーブルの重量を加えると、コアカット時には1トンから1.5トンの張力がケーブルにはかかっていた。そのためか、ケーブルドラムの下段に巻かれているケーブルは強い張力で損傷した。断線やショートにより3芯が使用不可になり、ウインチモーター用が1本のみとなったが、コア掘削を続けた。しかし、3034 m 深を掘削しているときに、残りの1本が断線して掘削不可となってしまったので、3500 m ケーブルに巻き替えた。

4.3. マスト

大きな問題はなかった。

4.4. モニターとコンピュータ

地上にある中継コンピュータのデバイスが発熱してコンピュータが暴走することがあった。これにはファンを付けて内部を冷やすことで対応した。また、中継コンピュータのトランスから煙が出たことがあり、予備のトランスと交換した。3500 m 長のウインチケーブルを介してのドリルコンピュータと中継コンピュータの通信がたびたび不調になった。ドリルコンピュータボードの設定変更や、ボード交換により対応したが、耐圧室を分解する必要があり、非常に消耗する作業であった。掘削時のドリルモーターの過電流によりドリルコン

ピュータボードの電子回路の一部が焼けたことがあり、ボード交換を行った。

4.5. 異物落下・脱落

ドリルの点検は適宜実施したが、ボルトが十分に締まっておらず、ドリルを地上に回収したらボルトが抜けていたことがあった。脱落したボルトへの接触によりコア掘削できない、カッターの刃先が欠ける、などの現象が生じたため、カッターマウントのシューを強力磁石シューに取り換えて、掘削孔底にあった脱落部品を回収した(図13)。

4.6. 掘削孔の収縮

液封液の液面を120 m深から130 m深の間に維持したので、掘削孔の収縮は生じなかった。

4.7. 氷床底部の温暖氷掘削

氷床底面は圧力融解温度 -2°C に達しており、氷床底部は温暖氷の掘削となり、短いコア長の掘削しかできなくなったので、3006.73 m深以降、コアバレルが2 m長である作業の容易なショートドリル(氷床底部ドリル)に変更した。カッターマウントの凸凹を極力無くし、切削チップの輸送をスムーズにするため、カッター、コアキャッチャー、コアバレル、逆流防止弁、駆動シャフト、ブースターは、表面にテフロン加工を施した。地上作業は楽になったが、温暖氷掘削の困難を解決することは出来なかった。

4.8. チップ回収器とベイラー

チップ回収器には特に問題はなかった。コア掘削中に生じた切削チップは、ドリルのチップ室に回収できたので、掘削孔に残っている切削チップはほとんどなかった。氷床底部の温

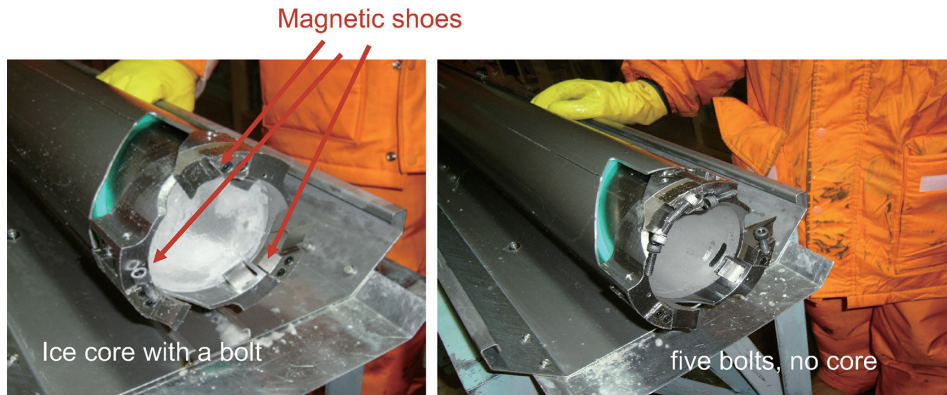


図13 孔内に落下したボルトを強力磁石で回収。

Fig. 13. Fishing of bolts.

暖氷の掘削が困難なため、底面付近の液封液密度を大きくし、切削チップを浮かせてコア掘削することを考えた。そのため高密度液をベイラーに詰めて掘削孔底部へ注入することとした。しかし、高密度液を入れてベイラーを鉛直に立てると、液が下のパッキンから漏れ出してしまふので、この試行は出来なかった。

5. 今後の課題

5.1. 掘削システムの改良

2006～07年に48次隊が第2期深層掘削を終了してから10年以上が経った。80万年以上古いアイスコアを採取するという第3期深層掘削計画が2016年からの南極地域観測第9期6か年計画で採択され、新たな深層掘削の目標が見えてきた。深層掘削の技術をさらに進化させる絶好の機会である。以下に、今後の課題を提案する。

5.1.1. 切削チップの処理

氷床深層コア掘削の最も重要なポイントは“チップ処理”である。切削チップをうまく“取り込んで”、“運搬して”、“貯蔵できれば”掘削はうまく行く。この三つの機能をもっとも確実に行うことができる方法・構造はどのようなものであろう。現状では電動ポンプ (Shturmakov *et al.*, 2014)、機械式往復ポンプ (Johnsen *et al.*, 2007)、アルキメディアンポンプ (Takahashi *et al.*, 2002) などの方法が見られる。切削チップの回収率が悪いとチップ回収runが必須となり、深層掘削にかかる期間が延びる要因となる。第2期深層掘削では、ほぼ100%の切削チップをチップ室に輸送して回収することができた。それゆえJAREドリルのアルキメディアンポンプ(スパイラル付コアバレル)を他の方式に取り替える積極的な必要性は無いが、以下の三つの機能の向上を追求することが望ましい。

5.1.1.1. JAREドリルの切削チップ処理機構

JARE深層ドリルに限らず液中掘削では液の循環が良いほど切削チップの回収効率は上がる。液の循環を説明する。JAREドリルの場合は、コアバレル(アルキメディアンポンプ)の回転によって液は上方のチップ室へと運搬される。この液はチップ室に設けられた45000個の小穴からドリルの外へ出て、氷の壁との隙間をカッターの方向へ降りていく。カッターの付近まで下降した液はジャケットの下端から吸引され、再びコアバレルによって運搬されて同じ経路の循環を繰り返す。液に混ざって取り込まれた切削チップは、チップ室にて濾過されて貯蔵される。ポンプ力の発生：ポンプ力が無ければ液の輸送や循環は起こらない。JAREドリルの場合、ポンプ力を生み出しているのは、厚みのあるスパイラル、ジャケット内面にあるエッジが立った6本の縦方向リブである。コアバレル表面には3条のスパイラルが取り付けられている。コアバレルが回転するとこの周りがある液も同じように回転しようとする。液には粘性があるからである。しかし、液がコアバレルと同じ回転数で回転していたのでは、いつまでたっても液は上昇していくことはない。ジャケット内面に取り付けられ

た縦方向のリブがあると、液の回転にブレーキがかかり、コアバレルの回転数と液の回転数に差が出る。この回転数の差が液の上昇力を生み出す。そうすると、縦リブの抵抗は大きければ大きいほうが良い、スパイラルは滑らかで抵抗が少ないほうが良い、スパイラルの厚みが大きい方が沢山の液を処理できる、回転数は速いほうが良い、という事になる。

5.1.1.2. ブースターの役割

ブースターの役割や機能についての理解は十分ではない。はたしてブースターはポンプなのかコンベアなのか。わかっていることは、チップ室内でチップの「圧密」には役立っていることである。まず、ポンプ機能はほとんど無いと思われる。Takahashi *et al.* (2001) は、いろいろなポンプの性能比較実験を行っている。この報告によると、「ブースターは液を押し上げる圧力がゼロであったので液体ポンプとは言えない」と報告されている。それでは、ブースターはなぜ圧力が出ないのか。船のプロペラのように1分間に何千回転も回れば水を送ることができるものの、JARE ドリルの場合は、回転速度が50~60 rpm という低速回転で、それでは圧力が出ないのであろう。ブースターの機能として一つ考えられるのは「コンベア」である。切削チップが液に浮遊しているような状態では難しいが、液が抜け出して切削チップの濃度が濃くなった時に、機械的コンベアのような機能が生ずることが考えられる。もう一つのブースターの役割として、貯蔵する切削チップを分割して貯蔵密度を平均化することに寄与していることは明らかである。ブースターの役割や機能を研究して、理想的なブースターの形状と配置を見つけ出す努力が必要である。

5.1.1.3. 一つのシステムとしての液の循環経路

JARE ドリルのポンプ（コアバレル）の欠点は圧力が低いことである。このことには第1期深層掘削で判明した。圧力が低いという特性のもとで、液の循環を確保するには、液が循環する経路の抵抗を減らすしか方法は無い。そこで、第2期深層掘削用ドリルでは、チップ室に多数の小穴を設けてフィルタ面積を大幅に拡大し、液の流動抵抗を減らした。その結果、ドリルの掘削性能は飛躍的に向上した。改良のポイントは、ポンプ能力はなるべく大きくして、循環経路の抵抗はなるべく小さくする必要がある。この観点から、さらに試作と実験を行い、能力の理論的解析や理解を得たうえで理想形を見つけ出すことを提案する。

5.2. 下降速度・上昇速度の遅さ

3000m の深さまでドリルを降ろすのに2時間かかっている。これではあまりにも効率が悪い。下降速度が遅い原因は、カッターマウントと掘削孔の壁との隙間が狭いからである（直径135 mm と 132 mm）。片側1.5 mm の隙間しかなく、ここを液はむりやり流れなければならぬ。しかし、この1.5 mm の隙間（カッターだけが外へ飛び出す状態）を大きくすれば、切削チップを取り込む性能に悪影響が出るため、むやみに大きくすることはできない。やはり、下降時には Hans Tausen ドリル（Johnsen *et al.*, 2007）のようにドリルの中を液が流れる

ように考えるべきであろう。また、巻き上げ速度も 0.8 m/s であって速いとは言えない。せめて 1.0 m/s 程度にしたい。これは、ウインチモーターを大型化することが有効であると思われる。現在は、11 kW の出力である。なお、ドリル本体と掘削孔の壁との間は、液の流れを確保する目的で十分広くとってある（直径 135 mm と 123 mm、片側 6 mm）。ドリルの設計としては、この 6 mm をもっと小さくしたい。この隙間が小さいということは、カッターの幅が小さくなり、切削面積が減って、チップの発生量も少なくなるからである。

5.3. 自動化

第 1 期深層掘削では氷コア掘削中に刃先の接地圧を検知して、その圧力が一定になるようにウインチを繰り出す、という自動掘削が可能であった。第 2 期深層掘削でも活用したが、手動でも最適なウインチ繰り出し速度を設定すれば、そのあとの調整不要で、安定した低い接地圧での掘削が出来た。もう一つ自動化したい部分は、ドリルを降ろしたり巻き上げたりする場合のウインチの昇降制御である。手動操作にて掘削技術者の技量をいかんなく発揮させることが出来るが、自動化できる部分は大いに自動化した方が安定したミスのないオペレーションが可能になる。

5.4. 温暖氷の掘削方法の確立

第 2 期掘削においては、深さ 3000 m を越えて温暖な氷に近づいてくると、一回で掘れる掘削長が短くなってきた。最後はドリルに水が再凍結して掘削不能となり、掘削を終了せざるを得なかった。“水が出たら掘削は終わり”と言うのが掘削技術者の間では常識になっているようであるが、できれば岩盤まで掘りたい。第 3 期深層掘削においても“温暖な氷は無い”、“絶対に水は出ない”、とは言い切れないのではないか。圧力融解点に近い温暖氷や水交じりの氷の掘削方法を研究するべきであると思う。水の化学成分によって絶縁性能に悪影響を与え、ひいては掘削困難となることにも対応すべき点がある。また、氷床底面が融解して水脈や氷床下湖があると、液封液によって地下水系全体を汚染する恐れがあるので汚染のない掘削法も開発する必要がある。

5.5. 三分割カッターの研究

現行の JARE ドリルのカッター幅は約 20 mm ある。三分割カッターとは、一個のカッターの刃幅を 20/3 mm としたものである。（注：厳密にはいくらかの重複があるので 20/3 mm よりやや大きい）

そうすると、切削ピッチは現行の 3 倍と大きくなる。具体的に説明すると、現行のカッターと 3 mm ピッチのシューの組み合わせで掘った場合は 1 mm 隔の切削ピッチが現れる。これを、三分割カッターと 3 mm ピッチシューの組み合わせで掘った場合は 3 mm 間隔の切削ピッ

チがコアの表面に現れる。その結果、切削チップは大粒となる。「氷の掘削においては、大粒径のチップを取ることが重要である」と記述してきた。細かいチップは、お互いに固まりやすくドリルの各部に付着したり詰まりを生じさせやすい、スリップリングなどに侵入してトラブルを引き起こす、チップ室に貯蔵された細かいチップは液の流動抵抗を増加させる、などの弊害を引き起こす。上記のようなトラブルが避けられれば、氷床底面の温度の高い氷の掘削もうまく行くことが期待できる。また、コペンハーゲン大学を中心とするグリーンランド掘削計画の技術者からは、掘削に必要な電力も減少したと報告されている。

5.6. その他

通信装置の不安定、ドリルモーターのパワーアップの必要性、スリップリングの破損、カッターの寿命、コアキャッチャーがコアを削ってしまう問題、ベイラーの漏れなど多くの課題が指摘されている。これらを忠実に改善していくことは言うまでもない。その他、オペレーション上の難しさ、人手不足などなど様々な問題が出てくることは間違いないと思われる。

6. おわりに

第二期深層掘削用の JARE ドリルは、一回でとれるコアの長さ、掘削の高速化による時間の短縮、安定性などの点において飛躍的な進歩を遂げた。この成果をもたらした最も大きな要因は、チップ収納室に 45000 個の小穴を開けるというアイデアであると言っても良い。このアイデアは、Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland や South pole ice core project のドリルにも採用された。JARE 深層ドリルの特徴は①コアバレル（アルキメディアンポンプ）、②チップ室のシャフトに取り付けた数個のブースター、③チップ室に開けた 45000 個の小穴からなるスクリーン、この三者がトータルとしてもたらす効果である。これらを基本にさらに研究を重ねて進化させていくことが望まれる。第3期ドームふじ深層掘削計画が 2016 年に認められた。今後の課題を取り入れて、予算が許す限り、最先端のドリルシステムを開発・作製すべきである。

謝 辞

ドリル開発については、第2期ドームふじ推進プロジェクト・掘削技術小委員会を中心にして進めた。ドリル製作については、北海道大学低温科学研究所、(株)地球工学研究所、九州オリンピック工業(株)、(株)ジオシステムズ、(株)オーテックエレクトロニクス、日本伸管(株)、東洋刃物(株)などの優秀な技術とアイデアによるものが大きい。深層掘削訓練に関しては、グリーンランドで実施された NGRIP や NEEM などの国際深層掘削プロジェクトへの参加、南極にて深層掘削を行った EPICA-Dome C や EPICA-DML での掘削参加、北海道陸別町しばば技術研究所の協力を得て実現した掘削タワーによる深層掘削実験による訓

練などが、ドームふじでの深層掘削技術の基礎になった。ドームふじ基地での深層掘削に関しては、南極地域観測隊の多くの隊員による内陸輸送、基地設営等の強力なサポートを受けた。査読過程においては匿名査読者から適切なコメントをいただいた。ここに感謝申し上げます。

文 献

- Augustin, L., Panichi, S. and Frascati, F. (2007a): EPICA Dome C2 drilling operations: performances, difficulties, results. *Annals of Glaciology*, **47**, 68–72, doi: 10.3189/172756407786857767.
- Augustin, L., Motoyama, H., Wilhelms, F., Johnsen, S., Hansen, S. B., Talalay, P. and Vasiliev, N. (2007b): Drilling comparison in 'warm ice' and drill design comparison. *Annals of Glaciology*, **47**, 73–78, doi: 10.3189/172756407786857820.
- Azuma, N., Tanabe, I. and Motoyama, H. (2007): Heat generated by cutting ice in deep ice-core drilling. *Annals of Glaciology*, **47**, 61–67, doi: 10.3189/172756407786857848.
- Casey, K. A., Fudge, T. J., Neumann, T. A., Steig, E. J., Cavitte, M. G. P. and Blankenship, D. D. (2014): The 1500m South Pole ice core: recovering a 40ka environmental record. *Annals of Glaciology*, **55** (68), doi: 10.3189/2014Aog68A016.
- 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・渡辺興亜 (1990) : 氷床深層ドリルの開発. 南極資料, **34**, 303–345, doi: 10.15094/00008689.
- 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・齊藤隆志・斎藤 健・庄子 仁・白岩孝行・成田英器・神山孝吉・古川晶雄・前野英生・榎本浩之・成瀬廉二・横山宏太郎・本堂武夫・上田 豊・川田邦夫・渡辺興亜 (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, doi: 10.15094/00009071.
- Fujii, Y., Azuma, N., Tanaka, Y., Nakayama, Y., Kameda, T., Shinbori, K., Katagiri, K., Fujita, S., Takahashi, A., Kawada, K., Motoyama, H., Narita, H., Kamiyama, K., Furukawa, T., Takahashi, S., Shoji, H., Enomoto, H., Saitoh, T., Miyahara, M., Naruse, R., Hondoh, T., Shiraiwa, T., Yokoyama, K., Ageta, Y., Saito, T. and Watanabe, O. (2001): Deep ice core drilling to 2503 m depth at Dome Fuji, Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. issue*, **56**, 103–116.
- Fujita, S., Yamada, T., Naruse, R., Mae, S., Azuma, N. and Fujii, Y. (1994): Drilling fluid for Dome F Project in Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. issue*, **49**, 347–357.
- Johnsen, S. J., Hansen, S. B., Sheldon, S. G., Dahl-Jensen, D., Steffensen, J. P., Augustin, L., Journé, P., Alemany, O., Rufli, H., Schwander, J., Azuma, N., Motoyama, H., Popp, T., Talalay, P., Thorsteinsson, T., Wilhelms, F. and Zagorodnov, V. (2007): The Hans Tausen drill; Design, performance, further developments and some lessons learned. *Annals of Glaciology*, **47**, 89–98, doi: 10.3189/172756407786857686.
- 亀田貴雄・藤井理行・高橋昭好・田中洋一・成田英器・新堀邦夫・東 信彦・古川晶雄・吉本隆安・宮原盛厚・五十嵐 誠・河野美香・的場澄人・戸山陽子・佐藤和秀・高橋修平・渡邊興亜 (2002) : 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—. 南極資料, **46**, 377–398, doi: 10.15094/00009230.
- 亀田貴雄・大日方一夫・高橋 暁・谷口健治・杉田興正・藤田耕史・栗崎高士・中野 啓 (2005) : 南極ドームふじ観測拠点における新掘削場の建設—第44次ドームふじ越冬隊による作業—. 南極資料, **49**, 207–243, doi: 10.15094/00009326.
- Litvinenko, V. S., Vasiliev, N. I., Lipenkov, V. Ya., Dmitriev, A. N. and Podoliak, A. V. (2014): Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 165–172, doi: 10.3189/2014Aog68A040.
- 本山秀明 (2006) : ドームふじ氷床深層掘削オペレーションのすべて. 極地, **83**, 56–63.
- Motoyama, H. (2007): The Second Deep Ice Coring Project at Dome Fuji, Antarctica. *Scientific Drilling*, **5**, 41–43, doi: 10.2204/iidp.sd.5.05.2007.
- Motoyama, H., Takahashi, A., Tanaka, Y., Shinbori, K., Miyahara, M., Yoshimoto, T., Fujii, Y., Furusaki, A., Azuma, N., Ozawa, Y., Kobayashi, A. and Yoshise, Y. (2020): Deep ice core drilling to the depth of 3035.22m at Dome Fuji, Antarctica in 2001–2007. *Annals of Glaciology*, **61**, (in press).
- 南極 OB 会編集委員会 (2019) : 改訂増補 南極読本, 成山堂書店, 270p.

- Narita, H., Shinbori, K. and Kodama, Y. (1994): An experiment on ice cutting under high liquid pressure and low temperature. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. issue*, **49**, 124–131.
- 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・渡辺興亜 (1995): 氷床深層ドリルの開発 (II). *南極資料*, **39**, 99–146, doi: 10.15094/00008891.
- Popp, T. J., Hansen, S. B., Sheldon, S. G. and Panton, C. (2014a): Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 53–64, doi: 10.3189/2014AoG68A042.
- Popp, T. J., Hansen, S. B., Sheldon, S. G., Schwander, J. and Johnson, J. A. (2014b): Drilling into debris-rich basal ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 199–206, doi: 10.3189/2014AoG68A029.
- 齊藤隆志・木下 淳 (2005): 第43次南極地域観測隊内陸行動報告2002–2003 (第二期ドームふじ氷床深層掘削計画関連). *南極資料*, **49**, 192–206, doi: 10.15094/00009325.
- Shturmakov, A. J., Lebar, D. A. and Bentley, C. R. (2014): DISC drill and replicate coring system: a new era in deep ice drilling engineering. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 189–198, doi: 10.3189/2014AoG68A017.
- Slawny, K. R., Johnson, J. A., Mortensen, N. B., Gibson, C. J., Goetz, J. J., Shturmakov, A. J., Lebar, D. A. and Wendricks, A. W. (2014): Production drilling at WAIS Divide. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 147–155, doi: 10.3189/2014AoG68A018.
- Souney, J. M., Twickler, M. S., Hargreaves, G. M., Bencivengo, B. M., Kippenhan, M. J., Johnson, J. A., Cravens, E. D., Neff, P. D., Nunn, R. M., Orsi, A. J., Popp, T. J., Rhoades, J. F., Vaughn, B. H., Voigt, D. E., Wong, G. J. and Taylor, K. C. (2014): Core handling and processing for the WAIS Divide ice-core project. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 15–26, doi: 10.3189/2014AoG68A008.
- 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.
- 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・渡辺興亜 (1996): 氷床深層掘削ドリルの開発 (III). *南極資料*, **40**, 25–42, doi: 10.15094/00008919.
- Takahashi, A., Fujii, Y., Azuma, N., Motoyama, H., Shinbori, K., Tanaka, Y., Narita, H., 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.
- 高橋昭好 (2005): 温暖氷コア掘削ドリルの開発. *雪氷*, **67** (3), 245–250, doi: 10.5331/seppyo.67.245.
- Talalay, P. G. (2014): Drill heads of the deep ice electromechanical drills. *Cold Regions Science and Technology*, **97**, 41–56.
- Talalay, P. G. (2016): *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer Geophysics, doi: 10.1007/978-981-10-0560-2. 284p.
- Talalay, P. G. (2020): *Thermal Ice Drilling Technology*. Springer, 278p.
- Tanaka, Y., Takahashi, A., Fujii, Y., Narita, H., Shinbori, K., Azuma, N. and Watanabe, O. (1994): Development of a JARE deep ice core drill system. *Natl. Inst. Polar Res., Spec. issue*, **49**, 113–123.
- Uemura, R., Motoyama, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J., Kawamura, K., Goto-Azuma, K., Fujita, S., Kuramoto, T., Hirabayashi, M., Miyake, T., Ohno, H., Fujita, K., Abe-Ouchi, A., Iizuka, Y., Horikawa, S., Igarashi, M., Suzuki, K., Suzuki, T. and Fujii, Y. (2018): Asynchrony between Antarctic temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, **9**, 961, doi: 10.1038/s41467-018-03328-3.
- 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. *Annals of Glaciology*, **29**, 176–178, doi: 10.3189/172756499781821553.
- Wilhelms, F., Miller, H., Gerasimoff, M. D., Drücker, C., Frenzel, A., Fritzsche, D., Grobe, H., Hansen, S. B., Hilmarsson, S. Æ., Hoffmann, G., Hörnby, K., Jaeschke, A., Jakobsdóttir, S. S., Juckschat, P., Karsten, A., Karsten, L., Kaufmann, P. R., Karlin, T., Kohlberg, E., Kleffel, G., Lambrecht, A., Lambrecht, A., Lawer, G., Schärmeli, I., Schmitt, J., Sheldon, S. G., Takata, M., Trenke, M., Twarloh, B., Valero-Delgado, F. and Wilhelms-Dick, D. (2014): The EPICA Dronning Maud Land deep drilling operation. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 355–366, doi: 10.3189/2014AoG68A189.
- Zhang, N., An, C., Fan, X., Shi, G., Li, C., Liu, J., Hu, Z., Talalay, P., Sun, Y. and Li, Y. (2014): Chinese First Deep Ice-Core Drilling Project DK-1 at Dome A, Antarctica (2011–2013): progress and performance. *Annals of Glaciology*, **55** (68), 88–98, doi: 10.3189/2014AoG68A006.