

雪氷表層メカニカルドリルの切削特性

藤井理行¹・田中洋一²・成田英器³・宮原盛厚⁴・高橋昭好⁴

A Laboratory Investigation of Ice Cutting with a Lightweight Electromechanical Drill

Yoshiyuki FUJII¹, Yoichi TANAKA², Hideki NARITA³, Moriatsu MIYAHARA⁴
and Akiyoshi TAKAHASHI⁴

Abstract: A lightweight mechanical ice core drill of shallow depth capability was tested in a cold laboratory to obtain basic characteristics of electro-mechanical drills in connection with a development of a deep ice core drilling system. We obtained the following results. (1) The total energy is consumed one-third for ice cutting and two-thirds for barrel rotation. (2) For efficient ice cutting, large rake angle and adequate edge load are essential. (3) A possibility is shown for continuous measurement of shear stress of ice during ice coring.

要旨: 氷床深層コア掘削用のドリル開発に関連して、メカニカルドリルの切削特性を把握するため、表層コア掘削用の軽量メカニカルドリルの室内掘削試験を行った。得られたデータを、切削理論に基づいて考察し、次の結果を得た。(1) メカニカルドリルの消費エネルギーのうち、1/3 が切削に、2/3 がドリルの回転に使われる。(2) 切削エネルギーは氷のせん断角が大きいほど小さくなるので、効率のよい切削には、刃のすくい角を大きくし、刃先荷重を適切に調整する必要がある。また、(3) 掘削時の消費エネルギーや刃先荷重のモニターにより、氷床氷のせん断応力を連続的に測定できる可能性も示した。

1. はじめに

雪氷研究グループは、近い将来、クィーンモードランド氷床の頂部 Valkyrjedomen の最高地点 (77°12'S, 39°37'E, 3807 m; KAMIYAMA *et al.*, 1987) で、過去 15 万年前にさかのぼる氷床深層掘削を計画している (日本雪氷学会極地雪氷分科会, 1988)。このため、昭和 63 年度から 3 カ年の予定で、氷床深層コア掘削用メカニカルドリルの開発を開始した。

一般に、氷床の深さ 1000 m 以上では、氷の塑性変形速度が大きいため、深層掘削ドリルは、液封型にして、掘削孔の収縮を防ぐ必要がある。このため、深層用すなわち液封型メカ

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

² (株) ジオシステムズ. Geosystems Inc., Koraku Bldg. 401, 22-3, Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

³ 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.

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

ニカルドリルの開発にあたっては、

- (1) 耐静水圧 (300 気圧), 耐寒性 (-60°C),
- (2) 液封液による粘性抵抗や浮力,
- (3) 輸送量を最小限にするためのシステム全体の軽量化, 省電力化,

の 3 点を特に検討する必要がある。このうち, (2), (3) は, ドリルの寸法や形状に関係してくるほか, 切削の効率に大きく依存する。すなわち, 深層掘削では, 消費エネルギーの小さな効率の良いドリルの開発が必要である。

こうした観点から, 深層掘削ドリルの開発の一環として, メカニカルドリルによる切削の基本特性を調べるため, 一連の氷の掘削テストを行った。ここでは, その結果を切削理論に基づいて考察した。

2. 表層掘削用メカニカルドリルの概要

ハンドオーガーを用いての掘削は, 一般に 10-20 m 深までで, それ以深数 10-100 m の掘削には, 小型・軽量の電動メカニカルドリルが用いられる。こうしたドリルは, 米国 CRREL のランド型ドリル (RAND, 1976) や, スイスのルフリー型ドリル (RUFLI *et al.*, 1976) として開発されてきた。日本では, 北海道大学低温科学研究所の鈴木教授による一連の軽量型メカニカルドリル (ILTS-100, -130, -140; SUZUKI and SHINBORI, 1984) の開発がある。

表 1 表層コア掘削用メカニカルドリル (ILTS-100 型改) の仕様
Table 1. Specifications of the lightweight electromechanical drill.

項 目	仕 様
全体寸法	101.6 mm ϕ ×1660 mm
全体重量	25 kg
掘進速度 (標準)	300 mm/min
1 回の掘進長 (氷)	400 mm
バレル回転数 (有負荷時)	0-120 rpm 可変
バレル	寸法 88.8 mm ϕ ×2.0×1200 mm
バレルスパイラル	3 本 ポリエチレン製
刃	4 コ 幅 14 mm
コアキャッチャー	4 コ
ジャケット	寸法 101.6 mm ϕ ×1.6 mm×1345 mm
リブ	3 本 アルミ板
モーター	型式 直巻整流子モーター
定格入力	100 V 7.0 A
定格出力	450 W
無負荷時回転数	19000 rpm
時間定格	30 分
減速機	型式 遊星式 3 段
減速比	1/5×1/7×1/5=1/175
サイドカッター	4 コ 51 mm ϕ ×5 mm
アンチトルクブレード	標準 350 mm 4 本 長尺 550 mm 4 本

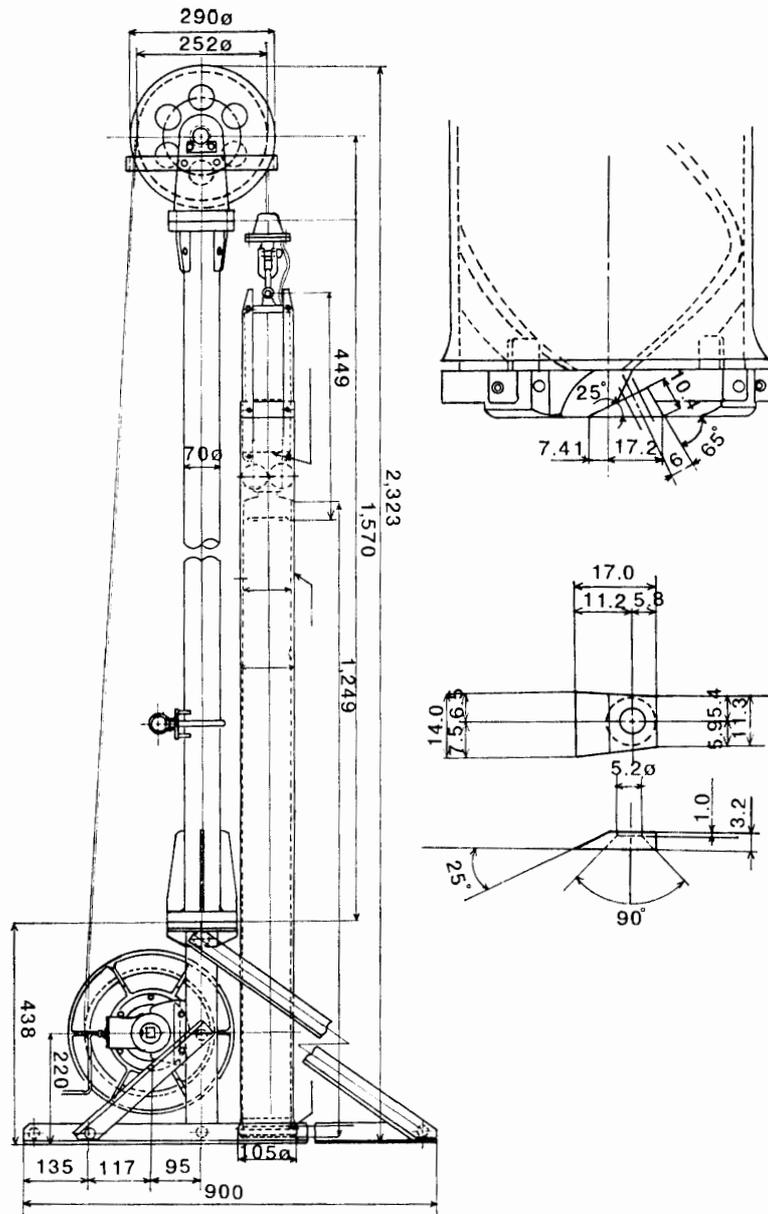


図 1 表層用メカニカルドリル (ILTS-100 型改) の概念図
 Fig. 1. The lightweight electromechanical drill (ILTS-100 type) used in the present study.

ここでは、その ILTS-100 型ドリルの仕様を一部変えた表層用メカニカルドリルを用いて、掘削特性の試験を行った。表 1 にそのドリルの仕様を、また図 1 に掘削試験に用いた表層掘削システムの概略設計図を示す。

ドリルは全長 1660 mm、直径 101.6 mm、重量 25 kg で、外管は厚さ 1.6 mm の鉄製である。図 2 にドリル本体の外観を示す。図 3 はバレル部を示す。バレルは長さ 1200 mm、直径 88.8 mm、厚さ 2 mm の鋼管で、幅 14 mm の刃が 4 枚ついている。ドリルモーターは直巻整流子モーターで、定格入力 100 V、7A、定格出力 450 W、無負荷時の回転数 19000

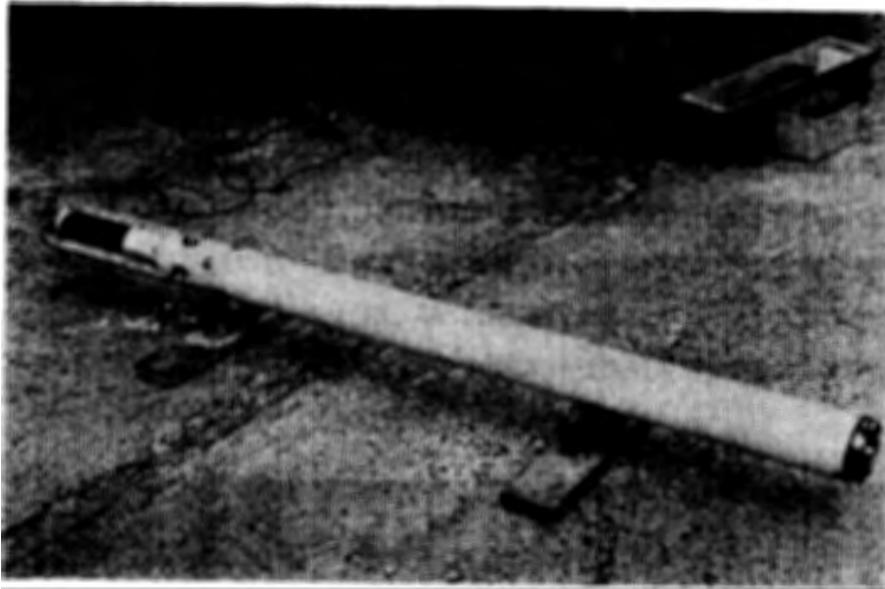


図 2 表層掘削用メカニカルドリル (ILTS-100 型改) の全景
Fig. 2. Whole view of the lightweight electromechanical drill.



図 3 コアバレル先端部分
Fig. 3. The core barrel.

rpm である。減速機は遊星式 3 段，減速比 1/175 である。

また，本ドリルは，標準掘削速度 300 mm/min，1 回の掘進長 400 mm，有負荷時のバレル回転数 0-120 rpm (可変) の掘削性能を有している。

3. 掘削試験とその結果

3.1. 試験方法

図 4 に示すように、市販氷 (45 cm×70 cm×15 cm) を用い、国立極地研究所の -20°C の実験室で 1988 年 7 月 20-21 日及び 8 月 3-4 日に掘削試験を行った。

試験は刃の出具合と電圧を変えて約 30 cm 掘削し、その時の電流・バレル回転数・掘進長、切削時間を測定した。バレルの回転数は、バレルと一定の比率にあるサイドカッターの回転数を実測することにより求めた。試験は 42 回行い、合計 27 回の実験データを得た。また、切削試験のほかにドリルの回転に要するエネルギーを調べるため、ドリルの回転試験も行った。

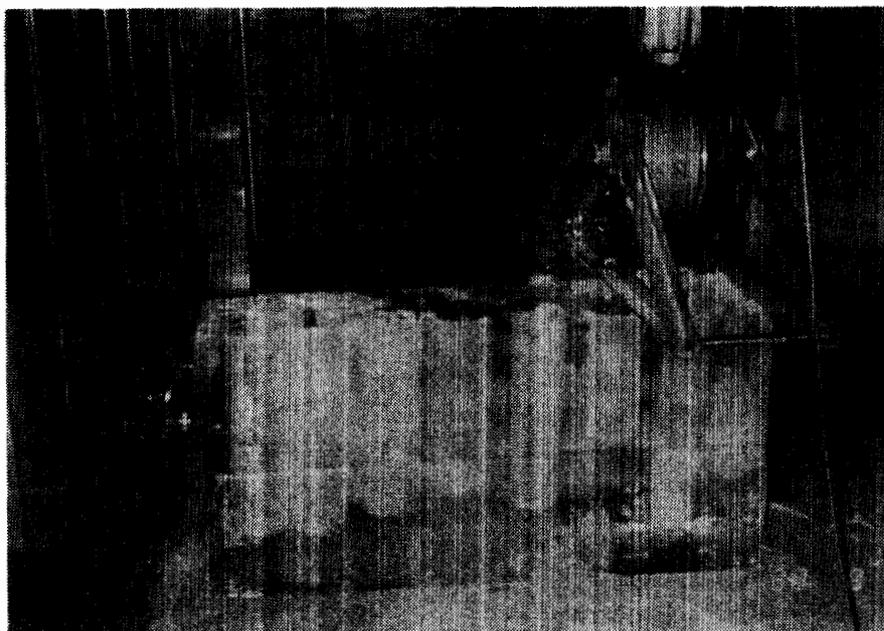


図 4 掘削テストに使用した氷とドリルウィンチ
 Fig. 4. The ice used for repeated drilling tests and the drill winch on it.

3.2. 掘削試験結果

表 2 に試験結果を示す。

各項目の意味は次のとおりである。

- | | |
|-------------|--|
| 刃 (mm) | : 刃の出具合。バレルの先端から刃先までの長さ。 |
| バレル回転 (rpm) | : バレルの回転数。 |
| 掘進長 (cm) | : 1 回の掘削試験で掘り進んだ距離。 |
| 電圧 (V) | : 1 回の掘削試験で設定された電源電圧。ドリルの制御盤における電圧値であり、ドリルモーターの端子電圧ではない。 |
| 電流 (A) | : 1 回の掘削試験中のドリルモーター電流。 |
| 切削時間 (s) | : 正味の切削時間。 |

表 2 掘削試験結果
Table 2. Experimental results of ice cutting.

run	刃 (mm)	バレル回転 (rpm)	掘進長 (cm)	電圧 (V)	電流 (A)	切削時間 (s)	掘進速度 (cm/min)	切り込み (mm)
1	0.25	119.0	44.7	125.0	4.0	199.0	13.5	0.28
2	0.25	77.0	29.8	80.0	3.3	204.0	8.8	0.28
3	0.50	133.0	37.0	126.0	3.7	127.5	17.4	0.33
4	0.50	84.0	29.0	80.0	3.0	147.1	11.8	0.35
5	0.50	133.0	42.0	125.0	3.7	146.5	17.2	0.32
6	0.70	126.0	42.6	125.0	4.0	84.3	30.3	0.60
7	0.70	70.0	39.5	80.0	3.5	144.1	16.4	0.59
8	0.80	119.0	42.5	125.0	4.0	77.7	32.8	0.69
11	0.50	130.9	41.7	124.0	5.3	100.0	25.0	0.48
12	0.50	100.1	42.3	100.0	4.3	130.0	19.5	0.49
13	0.50	51.8	34.2	70.0	4.0	190.0	10.8	0.52
14	0.25	142.8	51.4	125.0	4.5	130.0	23.7	0.42
15	0.25	62.3	22.9	70.0	3.7	161.0	8.5	0.34
16	0.70	150.5	29.7	125.0	4.5	84.0	21.2	0.35
17	0.70	52.5	26.9	70.0	4.0	135.0	12.0	0.57
19	0.70	144.9	25.3	125.0	4.5	55.0	27.6	0.48
20	0.80	123.9	25.5	125.0	4.3	65.0	23.5	0.47
21	0.80	53.2	24.9	70.0	4.0	102.0	14.6	0.69
32	0.25	42.0	14.2	60.0	3.1	122.0	7.0	0.42
33	0.25	61.6	31.3	70.0	3.2	182.0	10.3	0.42
36	0.50	46.9	27.0	60.0	3.1	163.0	9.9	0.53
37	0.70	39.2	36.0	60.0	3.3	203.0	10.6	0.68
38	0.80	42.7	39.6	60.0	3.4	190.0	12.5	0.73
39	0.80	57.4	42.5	70.0	3.4	153.0	16.7	0.73
40	1.00	119.0	38.5	126.0	4.0	117.0	19.7	0.41
41	1.00	50.4	41.5	70.0	3.6	116.0	21.5	1.06
42	1.00	36.4	41.3	60.0	3.4	161.0	15.4	1.06

掘進速度 (cm/min) : 平均掘進速度. 掘進長と切削時間から算出.

切り込み (mm) : 刃 1 枚当たりの平均切削厚さ. 掘進長とバレルの総回転数から算出.

3.3. 回転試験結果

バレルを空転させて, その時の消費エネルギーを調べるため, 回転試験を 6 回行い, 表 3 に示す結果を得た. 表 3 の結果に基づいて, ドリルを回転させるためだけに要するエネルギー (E_b) は, 次式で求めた.

$$E_b = I \cdot V_m \quad (\text{W}), \quad (1)$$

ただし, I : 電流, V_m : モーター端子電圧である. ここで, モーター端子電圧は電流 (I) と電源電圧 (V) を用いて次式から求められる.

$$V_m = V - (2.76 \times I + 0.79) \quad (\text{V}). \quad (2)$$

これは, 電源ケーブルの抵抗による電圧降下を考慮したもので, ケーブルの抵抗測定試験をもとに求めた関係である.

表 3 コアバレルの回転試験結果
Table 3. Experimental results of the barrel rotation.

run	電 圧 (V)	モーター電圧 (V)	電 流 (A)	電 力 (W)
51	125	90.4	3.4	307.2
52	110	81.0	3.1	251.0
53	100	72.7	3.0	218.2
54	90	64.5	2.9	186.9
55	80	57.7	2.7	155.8
56	60	40.7	2.5	101.9

モーター端子電圧と電力との 6 データの一次回帰式は次のとおりである。

$$E_0 = 4.1 \times V_m - 72.9 \quad (\text{W}). \quad (3)$$

$$(r^2 = 0.98)$$

今後、ドリルの回転のためだけに必要なエネルギーを基礎エネルギーと呼び、切削のために必要なエネルギーを切削エネルギーと呼ぶことにする。

ここで、次の関係がある。

$$\text{消費エネルギー} = \text{切削エネルギー} + \text{基礎エネルギー}.$$

基礎エネルギーはドリルの回転の他、バレルと外管との摩擦や振動などに消費される。切削エネルギーは氷を切削することや切りくずを移動させること、さらにコアとバレルとの摩擦などに消費される。したがって、純粋に切削のためだけに消費されるエネルギーは切削エネルギーよりも少ないことに注意すべきである。

3.4. エネルギー評価

試験結果から、前述の 3 種類のエネルギーを次式によって計算した。

$$\begin{aligned} \text{消費エネルギー} & E_t = V_m \cdot I, \\ \text{基礎エネルギー} & E_0, \\ \text{切削エネルギー} & E_c = E_t - E_0, \end{aligned}$$

ここで、 V_m は式 (2)、 E_0 は式 (3) から計算する。

掘削試験における上記の各エネルギーを表 4 に示す。表からわかるように、消費エネルギーの平均値は 190 W、基礎エネルギーは 126 W (全体の 66%)、切削エネルギーは 64 W (全体の 34%) である。したがって、消費エネルギーのうち 2/3 は基礎エネルギー、1/3 は切削エネルギーであるといえる。

$$\text{消費エネルギー} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{切削エネルギー} \quad 1/3 \\ \text{基礎エネルギー} \quad 2/3 \end{array} \right.$$

3.5. せん断角 ϕ

ここでは、メカニカルドリルがどのように氷を削っているのかを明らかにするため、切削理論の基礎にしたがって実験結果を整理した。まず、図 5 のように変数を定義する。すなわ

表 4 掘削試験における掘削消費エネルギーとその内訳となる基礎エネルギー, 切削エネルギー

Table 4. Experimental results of drilling total energy (left), the barrel rotation energy (middle) and ice cutting energy (right).

run	消費エネルギー (W)	基礎エネルギー (W)	切削エネルギー (W)
1	310.4	243.3	67.1
2	156.0	119.8	36.3
3	315.3	274.4	40.9
4	158.2	142.0	16.2
5	311.6	270.3	41.3
6	310.4	243.3	67.1
7	151.8	103.8	48.0
8	310.4	243.3	67.1
11	223.4	98.9	124.6
12	195.6	112.4	83.1
13	90.4	19.2	71.2
14	294.6	193.8	100.7
15	108.1	46.2	62.0
16	294.6	193.8	100.7
17	90.4	19.2	71.2
19	294.6	193.8	100.7
20	303.1	214.3	88.8
21	90.4	19.2	71.2
32	96.0	53.3	42.7
33	125.3	86.7	38.7
36	96.0	53.3	42.7
37	90.0	38.2	51.8
38	86.2	30.4	55.8
39	120.2	71.1	49.1
40	314.4	247.4	67.0
41	112.8	54.7	58.0
42	86.2	30.4	55.8
平均値	190.2	126.5	63.7
最大値	315.3	274.4	124.6
最小値	86.2	19.2	16.2
標準偏差	94.4	88.0	23.8
変動係数	49.6	69.5	37.4

ち,

t_i : 切り込み=掘進長/(バレルの総回転数×刃の枚数),

w : 削り幅=刃の幅 (14 mm),

F_c : 主分力=総切削エネルギー/(バレルの 総回転数×1 回転当たりの刃の移動距離×刃の枚数),

F_T : 背分力= $F_c - c \cdot f$ ただし, c =定数 (2), $f = \tau_s \cdot t_i$,

τ_s : せん断面せん断応力=氷のせん断応力 1 bar,

F_s : せん断面せん断力,

F_N : せん断面・垂直力,

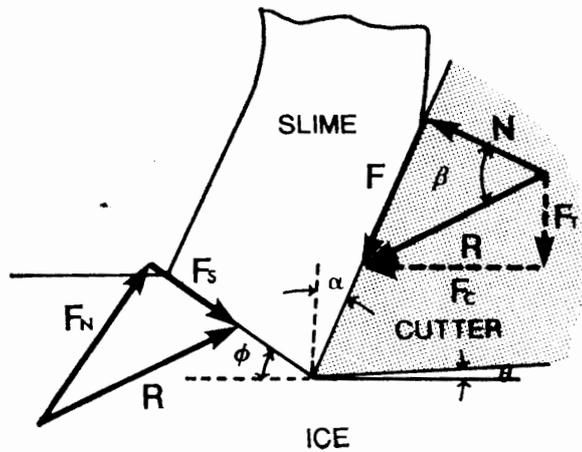


図 5 氷の切削模式図と各部に働く力
Fig. 5. Schematic diagram of ice cutting.

表 5 掘削試験における背分力, 主分力, まさつ角およびせん断角
Table 5. Thrust force, cutting force, friction angle and shear angle calculated with the experimental results.

run	背分力 (N)	主分力 (N)	$\beta - \alpha$ (deg)	β (deg)	ϕ (deg)
1	28.1	28.94	44.20	84.20	0.80
2	23.4	24.18	44.04	84.04	0.96
3	14.9	15.80	43.29	83.29	1.71
4	8.9	9.91	42.00	82.00	3.00
5	15.0	15.94	43.33	83.33	1.67
6	25.6	27.33	43.18	83.18	1.82
7	33.5	35.19	43.63	83.63	1.37
8	27.0	28.94	43.02	83.02	1.98
11	47.5	48.85	44.20	84.20	0.80
12	41.3	42.64	44.07	84.07	0.93
13	69.1	70.60	44.40	84.40	0.60
14	35.0	36.21	44.07	84.07	0.93
15	50.1	51.06	44.46	84.46	0.54
16	33.4	34.36	44.17	84.17	0.83
17	68.1	69.66	44.34	84.34	0.66
19	34.4	35.69	43.91	83.91	1.09
20	35.4	36.78	43.95	83.95	1.05
21	66.8	68.74	44.19	84.19	0.81
32	51.1	52.22	44.35	84.35	0.65
33	31.0	32.22	43.94	83.94	1.06
36	45.3	46.76	44.08	84.08	0.92
37	65.9	67.82	44.19	84.19	0.81
38	65.1	67.11	44.11	84.11	0.89
39	41.8	43.88	43.64	83.64	1.36
40	27.7	28.90	43.83	83.83	1.17
41	56.1	59.13	43.52	83.52	1.48
42	75.8	78.72	43.90	83.90	1.10
平均値	41.4	42.87	43.85	83.85	1.15
最大値	75.8	78.72	44.46	84.46	3.00
最小値	8.9	9.91	42.00	82.00	0.54
標準偏差	18.1	18.48	0.52	0.52	0.52
変動係数	43.8	43.10	1.19	0.62	45.42

- N : すくい面垂直力,
 F : すくい面摩擦力,
 R : 切削合力,
 α : すくい角 $=40^\circ$,
 β : まさつ角 $=\tan^{-1}(F_T/F_c)+\alpha$,
 θ : 逃げ角,
 ϕ : せん断角 $=\pi/4-(\beta-\alpha)$ (KRYSTOF の理論による関係)

である。これらの定義にしたがって、既知量から未知量を計算し、最後にせん断角 ϕ を求めた。結果を表 5 に示す。

得られたせん断角 ϕ の値は平均 1.2° ときわめて小さい。せん断角が小さいと、せん断面の面積が大きくなり、同じ切り込み量でも切削エネルギーは余分に必要となる。

背分力の計算値がドリルの自重から推定される背分力 (61N) に比べて、 $2/3$ と小さい理由は不明であるが、コアとバレル内壁との摩擦が一つの原因と考えられる。実際、コアを取り出すときに、かなり力のあることもあった。したがって、主分力におよぼす摩擦力の影響も無視できず、実際的主分力は、もっと小さい可能性がある。その場合、つりあっている背分力も小さく、せん断角はもっと大きな値となろう。このように摩擦力を考慮すると、主分力と背分力も表 5 とは異なってくる。

今回はコアとバレルの摩擦を考慮しなかった。それは、つぎの理由による。(1) メカニカルドリルの切削状況をだまかに材料加工学的に理解しようとした。(2) 今後の深層メカニカルドリルの開発に向けて、問題点をあきらかにしようとした。

第 4 章以降での議論では摩擦力を無視してはいるが、考慮した場合にも、今後の実験課題に関しては同様の結論となろう。

4. 議 論

試験結果をもとに、とくに重要と思われる次の 3 点について議論を進める。

- 現在開発中の深層掘削用メカニカルドリル試験機の実験項目を適切に決定すること。
- その実験結果を正しく理解すること。
- 深層掘削の過程において、氷床氷の性質に関してできる限り多くの情報を得る、いわゆる MWD (Measurement While Drilling) の可能性を探ること。

4.1. 深層掘削用メカニカルドリルの消費エネルギー

現在開発中の深層メカニカルドリルの基本仕様は、次のとおりである。

- 目標掘進速度: 45 cm/min 以上
 消費電力 : 700 W 以下
 回転数 : 0-60 rpm

コア径	: 108 mm
掘削口径	: 134 mm
刃幅	: 13 mm
刃のすくい角	: 45°
刃の数	: 3 枚

いま、回転数 50 rpm、掘進速度 45 cm/min とすると、切り込み (t_1) は 3 mm である。せん断角 (ϕ) を仮に 1 度として、主分力 F_c と背分力 F_T を求める。これらの力は次式で与えられる。

$$F_c = \tau_s t_1 w \cos(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha), \quad (4)$$

$$F_T = \tau_s t_1 w \sin(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha), \quad (5)$$

式 (4), (5) から、 $F_c = 223\text{N}$, $F_T = 215\text{N}$ となる。

ここで、背分力を荷重でまかなうためには、65 kgw 必要である。また、バレル回転 50 rpm のとき、切削に必要なエネルギーは、212 W となる。

深層ドリルのモーターの許容消費電力は 700 W である。したがって、液中での基礎エネルギーは 500 W 以下にしなければならない。すなわち、全消費エネルギーのうち基礎エネルギーを 70% 以下にしなければならない。これは、表層用ドリルに関して実現されている割合であるが、液中で稼働する深層用ドリルに関しては未知である。

したがって、深層掘削用メカニカルドリルの液中における回転にのみ必要な基礎エネルギーの測定は、今後の重要な実験項目であるといえる。

4.2. 切削時のせん断角

今回の実験結果を見ると、せん断角が小さい。そのために切削エネルギーが余分にかかりすぎているといえる。せん断角を大きくし、切削エネルギーを小さくするためにはどうするか、非常に重要な課題である。

そこで、せん断角と切り込みをあたえたときに、切削エネルギー、荷重（背分力を決定する）、主分力がどのようにつりあっているのかを調べた。

表 6 は深層メカニカルドリルに関する計算値である。表からわかるように、せん断角が現在の 1° から 4° に増加するだけで、切削エネルギーは 1/4 程度に減少する。たとえば、切り込み 3.2 mm の場合、せん断角が 1° のとき切削エネルギーは 230 W であるが、せん断角が 4° のときは 61 W (1° のときの 27%) となる。このようにせん断角を大きくすることによる切削エネルギーの減少は、せん断角度が小さい場合にきわめて大きいことがよくわかる。せん断角を大きくするためには、

(1) すくい角 α を大きくすること、

(2) 荷重を調節する。すなわち掘進速度を調節すること

が考えられる。

表 6 深層掘削用メカニカルドリルの開発仕様における切削要素の数値計算
刃数 3, 刃幅 13 mm, 刃の回転径 121 mm, 回転数 50 rpm, せん断力 100 kPa の場合.

Table 6. Simulation of cutting elements for development of a deep electro-mechanical drill; number of edges=3, edge width =13 mm.

切削エネルギー: P (W)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	57.1	114.2	171.4	228.5	285.6	342.7	399.8	457.0	485.5
1.0	28.8	57.6	86.4	115.2	144.0	172.8	201.6	230.4	244.8
2.0	14.6	29.3	43.9	58.6	73.2	87.9	102.5	117.2	124.5
4.0	7.6	15.1	22.7	30.2	37.8	45.4	52.9	60.5	64.3
8.0	4.0	8.0	12.0	16.0	20.1	24.1	28.1	32.1	34.1
12.0	2.8	5.6	8.5	11.3	14.1	16.9	19.7	22.6	24.0
16.0	2.2	4.4	6.7	8.9	11.1	13.3	15.5	17.7	18.8
20.0	1.9	3.7	5.6	7.4	9.3	11.1	13.0	14.8	15.7
25.0	1.6	3.1	4.7	6.2	7.8	9.3	10.9	12.4	13.2
30.0	1.4	2.7	4.1	5.4	6.8	8.1	9.5	10.8	11.5
35.0	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.2
40.0	1.1	2.2	3.2	4.3	5.4	6.5	7.6	8.7	9.2

荷重: W (kgw)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	18.1	36.2	54.2	72.3	90.4	108.5	126.6	144.7	153.7
1.0	9.0	17.9	26.9	35.8	44.8	53.8	62.7	71.7	76.2
2.0	4.4	8.8	13.2	17.6	22.0	26.4	30.8	35.2	37.4
4.0	2.1	4.2	6.4	8.5	10.6	12.7	14.8	16.9	18.0
8.0	1.0	1.9	2.9	3.9	4.9	5.8	6.8	7.8	8.3
12.0	0.6	1.2	1.8	2.4	2.9	3.5	4.1	4.7	5.0
16.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
20.0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	1.9	2.2	2.4
25.0	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.5
30.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
35.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6
40.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3

主分力: F_c (N)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	60.1	120.2	180.3	240.4	300.5	360.6	420.7	480.8	510.9
1.0	30.3	60.6	90.9	121.2	151.6	181.9	212.2	242.5	257.6
2.0	15.4	30.8	46.2	61.6	77.1	92.5	107.9	123.3	131.0
4.0	8.0	15.9	23.9	31.8	39.8	47.7	55.7	63.7	67.6
8.0	4.2	8.4	12.7	16.9	21.1	25.3	29.5	33.8	35.9
12.0	3.0	5.9	8.9	11.9	14.8	17.8	20.8	23.7	25.2
16.0	2.3	4.7	7.0	9.3	11.7	14.0	16.3	18.7	19.8
20.0	1.9	3.9	5.8	7.8	9.7	11.7	13.6	15.6	16.6
25.0	1.6	3.3	4.9	6.5	8.2	9.8	11.4	13.1	13.9
30.0	1.4	2.8	4.3	5.7	7.1	8.5	9.9	11.4	12.1
35.0	1.3	2.5	3.8	5.1	6.3	7.6	8.8	10.1	10.7
40.0	1.1	2.3	3.4	4.6	5.7	6.8	8.0	9.1	9.7

表 7 表層メカニカルドリルの開発仕様における切削要素の数値計算
刃数 4, 刃幅 14 mm, 刃の回転径 93 mm, 回転数 50 rpm,
せん断力 100 kPa の場合.

Table 7. Simulation of cutting elements for development of a lightweight
electromechanical drill; number of edges=4, edge width =14 mm.

切削エネルギー: P (W)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	63.0	126.1	189.1	252.2	315.2	378.2	441.3	504.3	535.8
1.0	31.8	63.6	95.4	127.2	159.0	190.7	222.5	254.3	270.2
2.0	16.2	32.3	48.5	64.7	80.8	97.0	113.1	129.3	137.4
4.0	8.3	16.7	25.0	33.4	41.7	50.1	58.4	66.8	70.9
8.0	4.4	8.9	13.3	17.7	22.1	26.6	31.0	35.4	37.6
12.0	3.1	6.2	9.3	12.4	15.6	18.7	21.8	24.9	26.4
16.0	2.4	4.9	7.3	9.8	12.2	14.7	17.1	19.6	20.8
20.0	2.0	4.1	6.1	8.2	10.2	12.3	14.3	16.4	17.4
25.0	1.7	3.4	5.1	6.9	8.6	10.3	12.0	13.7	14.6
30.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	8.9	10.4	11.9	12.7
35.0	1.3	2.6	4.0	5.3	6.6	7.9	9.3	10.6	11.3
40.0	1.2	2.1	3.1	4.1	5.1	6.2	7.2	8.2	8.7

荷重: W (kgw)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	26.0	51.9	77.9	103.9	129.8	155.8	181.7	207.7	220.7
1.0	12.9	25.7	38.6	51.5	64.3	77.2	90.1	102.9	109.4
2.0	6.3	12.6	19.0	25.3	31.6	37.9	44.2	50.5	53.7
4.0	3.0	6.1	9.1	12.2	15.2	18.2	21.3	24.3	25.8
8.0	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0	8.4	9.8	11.2	11.9
12.0	0.8	1.7	2.5	3.4	4.2	5.1	5.9	6.8	7.2
16.0	0.6	1.1	1.7	2.3	2.8	3.4	4.0	4.5	4.8
20.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
25.0	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	1.8	2.1	2.2
30.0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4
35.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8
40.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4

主分力: F_c (N)

ϕ/t_1	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.4
0.5	64.7	129.5	194.2	258.9	323.6	388.4	453.1	517.8	550.2
1.0	32.6	65.3	97.9	130.6	163.2	195.9	228.5	261.1	277.5
2.0	16.6	33.2	49.8	66.4	83.0	99.6	116.2	132.8	141.1
4.0	8.6	17.1	25.7	34.3	42.8	51.4	60.0	68.5	72.8
8.0	4.5	9.1	13.6	18.2	22.7	27.3	31.8	36.4	38.6
12.0	3.2	6.4	9.6	12.8	16.0	19.2	22.4	25.6	27.2
16.0	2.5	5.0	7.5	10.1	12.6	15.1	17.6	20.1	21.4
20.0	2.1	4.2	6.3	8.4	10.5	12.6	14.7	16.8	17.8
25.0	1.8	3.5	5.3	7.0	8.8	10.6	12.3	14.1	15.0
30.0	1.5	3.1	4.6	6.1	7.6	9.2	10.7	12.2	13.3
35.0	1.4	2.7	4.1	5.4	6.8	8.2	9.5	10.9	11.6
40.0	1.2	2.5	3.7	4.9	6.1	7.4	8.6	9.8	10.4

したがって、すくい角の異なる刃を用いた切削実験を行い、切削エネルギーを比較することが必須である。

荷重の調節については次項で述べる。

4.3. 刃先荷重のコントロール

一定のせん断角と切り込みで切削するときには、主分力と背分力がある値でつりあっている。表 6 からわかるように、深層ドリルではたとえば、せん断角 8° 、切り込み 3.2 mm の場合、主分力は 34 N 、これにつりあう背分力を荷重であたえたとすると 8 kg である。逆に、荷重が 8 kg になるようにウィンチを操作し、バレルの回転数を 50 rpm にすると、切り込みを 3.2 mm に保つこともできる。しかし、刃先荷重のコントロールを誤ると力は別のつりあい状態へ移行し、切り込みもちがってくる。このように、刃先荷重のコントロールは微妙である。これは、旋盤やボール盤を使うときの手にかかる力加減を思い出せば、当然であった。

表 7 は表層ドリルに関する計算結果である。この表から、現在の表層ドリルを用いた掘削（ドリルの自重を全部刃先にかけている）は荷重をかけすぎていて、せん断角が小さくなりすぎていることがわかる。荷重 25 kg 、主分力 40 N ではせん断角も切り込みもきわめて小さい。もし、荷重を 10 kg 程度に調節することができれば、切り込みは 3 mm 程度にまで上がり、効率よく切削できるようになるはずである。

せん断角が小さいことは、せん断面積が大きく、切りくず厚さも厚いことを表わしている。切りくず厚さを不必要に大きくすることは、切りくずの運搬のためには不利である。浅層ドリルの刃にしばしば切り粉が付着するのは、切りくず厚さが大きいことも一つの理由と考えられる。

切りくず厚さが大きいことは、深層ドリルの場合にもよい影響はなく、この点からも刃先荷重のコントロールが重要である。

以上、今後の深層メカニカルドリルの開発過程でとくに重要となる点について述べた。

これからの実験項目を次にまとめる。

- (1) 液中での基礎エネルギー測定,
- (2) すくい角を変えた切削,
- (3) 荷重を調節した掘削.

このように今回の掘削試験から、深層メカニカルドリルの具体的な試験項目が抽出できたことは、一つの成果である。

4.4. 氷床氷せん断応力のプロファイル測定の可能性

前述したように、主分力と背分力はそれぞれ式 (4), (5) で与えられる。

この 2 式のうち、主分力は掘削時の切削エネルギーからわかる。背分力は掘削時の荷重から求めることができる。また、 α と w は刃の形状から、 t_1 は切削時間とコア長から求めるこ

とができる。したがって、未知数は ϕ, β および τ_s である。

ところで、 ϕ, β および α の関係は近似的には、

$$\text{Krystof の関係: } \phi = \pi/4 - (\beta - \alpha), \quad (6)$$

$$\text{Merchant の関係: } \phi = \pi/4 - (\beta - \alpha)/2, \quad (7)$$

で表わすことができる。また、3変数の関係は実験的に求めることができる。したがって、切削時のデータと前もって求めた関係式によって、 τ_s を推定することが可能である。この推定値は切削現場でのものであるため、コアサンプルを実験室に持ち帰って測定した τ_s を補足する貴重なデータとなる。

氷床氷のせん断応力のプロファイル測定を行うために必要な実験を次にまとめる。

a) すくい角と切削速度を変えた切削実験

せん断角 ϕ を実験的に求めるために行う。切りくず厚さを測定する幾何学的方法や写真撮影法などによって、純粋に材料加工学的実験をくりかえす必要がある。ただし、刃の材料は掘削時のものと等しくできるが、氷に関してはそうはできない点が問題である。しかし、この実験を行う価値はきわめて大きい。

b) スライム（切りくず）運搬に伴うエネルギーの測定

純粋の切削エネルギーを求めるために行う。切削エネルギーにはスライム運搬に消費されるエネルギーも含まれており、これを差し引かなければ正しい切削エネルギーを求めることができない。

c) コアとバレル間の摩擦力の測定

正しい主分力 (F_c) と背分力 (F_r) の値を得るために行う。今回の実験では、コアとバレル内壁との摩擦力は無視できないほど大きかったかもしれないが、その測定を行わなかった。現在のシステムでは、正しい主分力を得るためには摩擦力の補正が必要である。また、正しい背分力は荷重からこの摩擦力を差し引いたものであるから、コアの長さとの関係性を把握しておかなければ背分力の見積もりを誤ってしまう。

そこで、

- (1) バレルからコアを取り出すときの力を測定して、摩擦力を知ること、
- (2) もっと直接的に主分力や背分力を測定する方法を開発すること、

などが必要である。

以上の議論を通じて、掘削過程そのものが貴重な検層データを提供するということが、これまで以上に明確に理解できた。

5. 結 語

表層掘削用メカニカルドリルの掘削試験を行い、切削理論をもとに結果を整理した。これによってメカニカルドリルの切削状況が明確に把握できるようになった。

整理結果のうち次の 2 点が最も重要である。第 1 に、ドリルを回転させるためだけに要するエネルギーが全体の 3 分の 2 であったこと、第 2 に、刃のすくい角と刃先荷重を調節することによって、切削効率を大幅に改善できる可能性のあることである。

さらに、現在開発中の深層掘削用ドリルの開発課題についても具体的に考察することができた。第 4 章の 1-3 節では技術的側面からみた今後の課題を取り上げ、4 節では学術的側面からみた今後の課題を取り上げた。このように、表層掘削用メカニカルドリルの試験によって、深層掘削用ドリルの開発課題のいくつかが明確になった。これは本報告の大きな収穫であり、深層掘削用ドリルの開発に貢献するものである。

謝 辞

表層メカニカルドリルを用いた掘削試験や深層コア掘削システムの開発にあたっては、多くの方の助言と援助を得てきた。北海道大学低温科学研究所の鈴木義男教授には、液封型メカニカルドリルの概念設計や実験について貴重な助言をいただいた。また、秋田大学鉱山学部の榊田勝実助教授には、切削理論の基礎を教えていただいた。今回の理論的考察は榊田助教授の教えに基づくものである。マックスプル工業(株)の高橋巖氏および助川昌平氏には、表層メカニカルドリルの制作と、実験室での試験に先だて行った屋外試験を、精力的に取り組んでいただいた。ここに、あわせて感謝する次第です。

文 献

- KAMIYAMA, K., AGETA, Y., OKUHIRA, F., FUJII, Y. and WATANABE, O. (1987): Glaciological and chemical characteristics of snow in the inland plateau, East Queen Maud Land, Antarctica. *Nankyoku Shiryo* (Antarct. Rec.), **31** (3), 163-170.
- 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. 17p.
- RAND, J. (1976): The USA CRREL shallow drill. *Ice Core Drilling*, ed. by J. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 133-137.
- RUFLI, H., STAUFFER, B. and OESCHGER, H. (1976): Light weight 50-meter core drill for firn and ice. *Ice Core Drilling*, ed. by J. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 139-153.
- SUZUKI, Y. (1984): Light weight electromechanical drills. *Ice Drilling Technology*, ed. by G. HOLDSWORTH *et al.* U.S. CRREL, Spec. Rep., **84-34**, 33-40.
- SUZUKI, Y. and SHINBORI, K. (1984): Mechanical drill systems for the 25th Japanese Antarctic Research Expedition. *Mem. Natl Inst. Polar Res.*, Spec. Issue., **34**, 188-196.

(1988 年 9 月 21 日受付; 1988 年 10 月 7 日改訂稿受理)