

一軸圧縮試験機で圧縮した雪の切削破壊抵抗^{****}

磯部金治^{*}・小林俊市^{**}・宮村兵衛^{***}

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Studies on the Cutting Resistance of Compacted Snow in Cold Room

By

Kaneharu Isobe, Toshiichi Kobayashi and Hyoe Miyamura

*Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center for
Disaster Prevention, Suyoshi, Nagaoka, Niigata-ken, 940, Japan*

Abstract

This paper is a result of studies on the cutting resistance of compacted snow by the use of a revolving table in the cold room.

The test specimens were collected from 3 different areas in the mountains by snow sampler (100 mm diameter). These samples were compacted at 10 mm per minute to a desired density (0.28 to 0.78 g/cm³) by a uniaxial compressing machine (compressed capacity 5 ton) in the cold room.

The 12 test specimens (width·length·height: about 100 × 150 × 70 mm) were put on the revolving table in a circle at 52 cm intervals. The relation of the compacted stress and Kinoshita's hardness was proportional to the 4th power of density of these samples of compacted snow.

The extent of the experimental conditions was as follows:

(1) Cutting blade

Width: 20, 30 and 50 mm (3 types)

Rake angle: zero to 47 degrees (5 types)

(2) Cutting condition

Speed: 5 to 128 cm/sec

Cutting depth: 2 to 12 mm

Temperature: -1 to ~16°C

The results of the tests are as follows:

(1) The horizontal cutting resistance of compacted snow (F_c) was represented in proportion to the 3rd to 4th power of density and increased linearly with increasing cutting depth and blade width.

(2) The relationship between the horizontal cutting resistance of compacted snow (F_c) and the temperature (t), rake angle of blade (α) was represented by an exponential equation.

* 元第3研究室長 (現在建設省建設大学校) ** 第3研究室研究員

*** 元第3研究室研究員 (現在建設省北陸地方建設局)

**** 特別研究「圧雪の発生機構及び処理工法に関する研究」(昭和49~53年度)の1テーマである。

(3) The horizontal cutting resistance of compacted snow (F_C) and cutting power (P_C) was represented by the next equation.

$$\begin{aligned} F_C &= \tau h b f T \\ \tau &= K \delta^n \\ f &= 2.13 (0.977)^\alpha \\ T &= 0.57 (-t)^{0.35} \\ P_C &= F_C V/270 \end{aligned}$$

where F_C : horizontal cutting resistance (kgf)
 τ : unit horizontal cutting stress (kgf/cm²)
 K : coefficient of proportion
 δ : density (g/cm³)
 n : exponent (3~4)
 h : cutting depth (cm)
 b : cutting width (cm)
 f : rectified coefficient of rake angle of blade
 α : rake angle (degree)
 T : rectified coefficient of temperature
 t : temperature (°C)
 P_C : cutting power (PS)
 V : cutting speed (km/h).

1. ま え が き

本報告は、山間地のしまり雪、または、新雪層からスノーサンプラーで採雪した試料を、低温室において一軸圧縮試験機で人工的に圧縮し（以下「人工圧雪または、圧雪」とする）その試料を、金属刃により切削実験を行ったものである。本研究は、科学技術庁国立防災科学技術センターで実施した特別研究「圧雪の発生機構及び処理工法に関する研究」の小テーマとして実施した。

本報告は、圧雪処理工法の適性化と処理機械の設計の基礎データとして役立てるため、人工圧雪の密度、硬度、温度、切刃の形状、切削深さ、切削速度と水平比切削抵抗の関係を求め、圧雪の各種性質、作業条件による機械的処理エネルギー、ならびに効率を求めようとしたものである。路面圧雪は、均一な組織構造体として取扱うことがむずかしいので、本実験では、人工圧雪を用いて、路面圧雪の力学的性質に大きく影響を及ぼすと思われる上記条件を低温室内で再現し、それぞれの人工圧雪試料の組織、密度、温度を一定条件に保って、切削実験を実施した。

2. 実験方法

2.1 試料の採取

実験用試料は、国道17号線の山間部3カ所で、降雪直後の新雪、あるいは、長期堆雪した深さ1m程度のざらめ層の下層に堆雪した、しまり雪の層から採取した。試料は、内径100mm、長さ400mmの、アクリル製透明スノーサンプラーで水平に採雪し、その雪を、サンプラー内でアクリル製ピストンにより予備圧縮の後、ポリエチレン製の袋に入れて、ドライアイスを含めた茶箱で運搬し、雪害実験研究所の低温室に保管した。新雪のサンプルは、前夜降雪のあった約20~25cmの新雪層から同様に採雪した(写真-1)。新雪密度が小さく、予備圧縮試料が短くなったので、二個のサンプルを合体し、さらに400mm以下に圧縮して、同様に処理して茶箱で運搬した。表1に採雪地における試料の採雪条件を示した。

写真 1 試料の採取状況
Photo. 1 Sampling of snow.

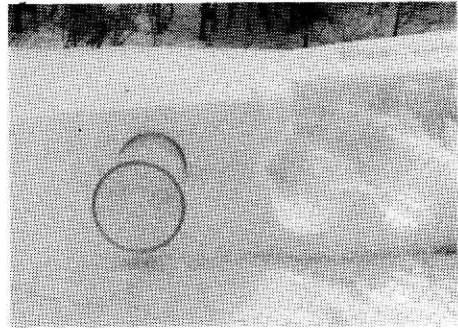


表 1 試料採取状況一覧表
Table 1 Conditions of snow sampling.

試料採雪 分類 年月日	天 候	気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	採雪場所の 地 形	標高 SL(m)	採 雪 法	雪 質	雪 温	予備圧縮 密 度 (g/cm^3)
A 54 ・ 2 ・ 14	曇 時 々 晴	2 ~ 7	国道17号線二居地区旧国道の近くの松手山尾根先端北斜面の吹きだまり(二居川左岸の日陰)	820	深さ約1mのざらめ層の下部の密度の大きいしまり雪の層に平行にサンプラーを挿入して採雪。サンプラー内で20~30mm予備圧縮	1月中旬頃降雪のあったしまり雪	0	0.27 ~ 0.41
B 54 ・ 2 ・ 16	曇 時 々 晴	-1.2 ~ 0.3	国道17号線船ヶ沢トンネル入口(上り)左側平坦地の日陰	900	前夜の積雪層(20~25cm)に平行にサンプラーを挿入し採雪の後、予備圧縮し、サンプラー2本分の試料を合体し、それをサンプラー内で長さ300mmまで圧縮。午前中の雪質は乾燥していたが(前夜は低温状態で降雪)午後昇温とともに表面は溶け出す。夕方は温度低下とともに硬化。	昨夜の新雪(手で固る) 0.136~ 0.081 g/cm^3	-02 ~ 0	0.23 ~ 0.31
C 54 ・ 2 ・ 27	曇	0	国道17号線火打峠附近杉林の中の平坦地	1,000	深さ約1mのざらめ層の下部のかなり締め固まった薄いしまり雪層より、主として垂直にサンプリングを行い、2~3個のサンプルを合体して予備圧縮し、1つの試料とする。	かなりざらめ雪に近く氷のつぶのまじったしまり雪	0	0.45 ~ 0.6

2.2 試料の前処理(圧縮, 整形, 接着)

採取試料は、室温 $-4.5 \sim -5.5^{\circ}\text{C}$ の低温室に数日間保存した。低温室内が乾燥している

ため、ポリエチレン袋の中でも試料の表層数mmが昇華し、円柱が変形していた。その資料を、保存時と同温度の低温室で整形し、内径101mmの鋳鉄製圧縮用半割りモールド内に装てんし、圧縮容量5tの一軸圧縮試験機で、毎分10mmの速度で圧縮した(写真2, 3, 表2)。圧縮量は、試料の最終長さ68~165mmの範囲で数群に分け、各種の密度(0.28~0.78g/cm³)のテストピースを作製した(写真4)。

圧縮後のテストピースは、ポリエチレン袋に入れて、-4.5~-5.5°Cの低温室内の茶箱に保管し、順次切削実験を行った。切削試料は、採雪グループごとに区分し、その中から12個を選び、4密度群に分類した。それぞれのテストピースの2面を、写真5に示すようにかんなで平行に整形し(厚さ50~70mm)、その試料を、回転圧雪試験機のテーブル上へ、あらかじめ0°C近くに冷やした井戸水を噴霧し、接着した。

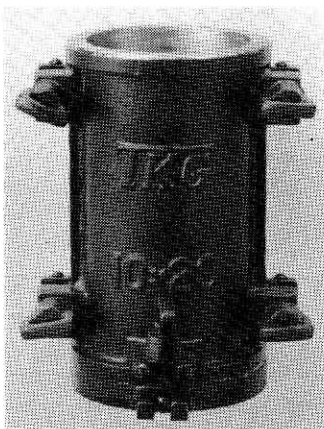


写真 2 半割りモールド

Photo. 2 Mold of separated type.

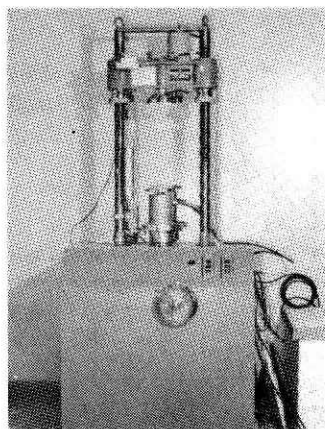


写真 3 一軸圧縮試験機

Photo. 3 Test machine for uniaxial compression.

表 2 一軸圧縮試験機の仕様

Table 2 Specifications of uniaxial compression test machine.

	項 目	仕 様
本 体	規 格	谷藤機械工業 電動 C B R 試験機改造型
	型 式	ひずみ制御方式
	量 大 荷 重 容 量	5 ton
	圧 縮 速 度	0.1 ~ 500 mm/min
	供 試 体 寸 法	最大 100 Ø × 250 mm
	電 動 機	0.75 kW (1 HP), 3 相 200 V
	変 速 機	リングコーン式無段変速, 変速比 1 : 10
	減 速 機	スパーギヤ減速, 5 段階, 1 / 5 n
計 測 部	ロ ー ド セ ル	共和電業 LU-5 TE, 5 ton
	変 位 計	共和電業 DT-100 A, 0 ~ 100 mm
	ひ ず み 測 定 器	三栄測器 6 M 57 A
	記 録 計	渡辺測器 W × 4402 (XYレコーダ)

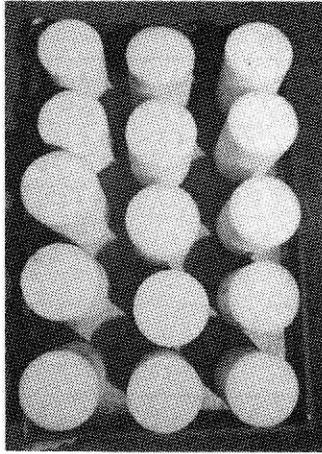


写真 4 圧縮試料
Photo. 4 Compressed snow samples.

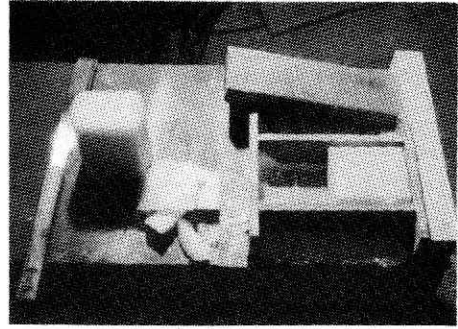


写真 5 試験試料の整形
Photo. 5 Trimming of test specimens.

2.3 人工圧雪の圧縮特性

一軸圧縮試験機による、圧縮力～変位曲線（オシログラム）の形状を図1に示した。オシログラムの一般的傾向は、試料の初期圧縮段階では、内部の雪粒子がずれながら空隙を埋め、のこぎり刃状の軌跡を描き、各ピーク値が少しずつ上昇する。採取した試料の雪質と内部空隙（初期密度）の違いにより、このオシログラムの波形と継続時間が異なる。さらに圧縮を続けて行くと、試料内部の空隙を埋めるための断続的なすべりがなくなり、A点を始点とし、上方に凹ななめらかな指数曲線状のカーブを描き急上昇する。図1の上限のB点がその試料の設定最大圧縮力になり、同時に、その点が試料の最大変位量（最大密度）である。表3は図1のオシログラムの各軸の単位と、対象となった試料の性状を示したものである。

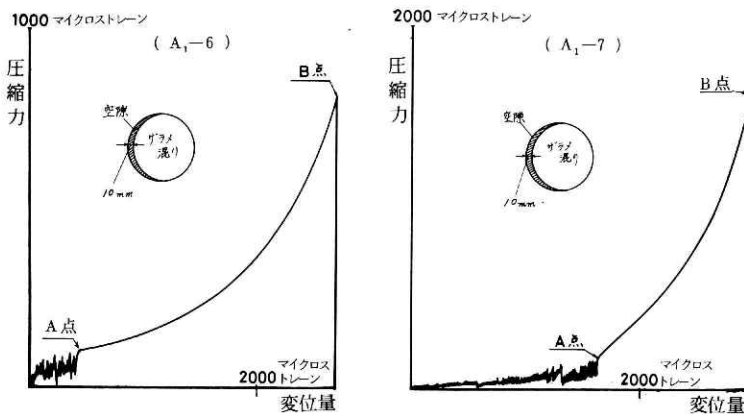


図 1 圧雪の圧縮力—変位曲線（表3参照）

Fig. 1 Compressive stress-strain relationship.

表 3 圧縮力・変位曲線の圧縮試料条件
Table 3 Specifications of compacted snow.

試料 (試料分類)		No.	A ₁ -6	A ₁ -7
試験年月日			5.4.4.10 (a.m)	
室温 (圧雪温)		℃	-4.5~-5.5	
初 (整形後)	試料長さ	mm	89.5	81
	試料正味重量	g	391.5	429.4
	試料密度	g/cm ³	0.287	0.315
サンプラー内径×長さ		mm	101×107	
圧縮速度		mm/分	10	
初 (A期点)	変位量	mm	13.1	49.6
	密度	g/cm ³	0.311	0.447
	応力	Kgf/cm ²	1.6	2.7
終 (B期点)	試料長さ	mm	89.5	81
	密度	g/cm ³	0.546	0.662
	応力	Kgf/cm ²	12.9	25.7
硬度 (木下式)		Kgf/cm ²	47	105
X Y レ コ ー ダ ー 係 数	変位量 (X軸)	mm/マイクロストレーン	0.03008	
	圧縮力 (Y軸)	kgf/マイクロストレーン	1.2684	
その他			茶箱 №6	

なお、圧縮過程の応力は、半割りモールドの側壁と試料の側部すべり摩擦が含まれている。

図2は、それぞれの採雪グループごとに各圧縮試料の最大密度と最大圧縮応力、硬度 (木下式) の関係を示したものである。圧縮応力は、密度の増大に対して指数曲線状に上昇する。試料グループAとBの値はほぼ一致するが、Cは同密度に対して、硬度が全体に少し小さく、圧縮応力は、密度の高い試料で上昇割合が大きくなっている。図2の密度と圧縮応力の関係を示す曲線と、図1のなめらかな曲線とはともに近似の指数曲線状のカーブを描く。したがって、3カ所の異なる場所で採取した、雪質の異なる試料の圧縮力～変位曲線ではあるが、すべて、ほぼ同一の線上にくる。図2の硬度は、圧雪温度-4.5~-5.5℃における切削実験

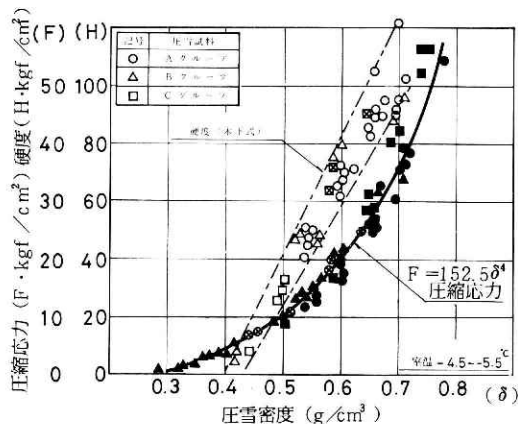


図 2 圧雪密度と圧縮応力および硬度の関係

Fig. 2 Relation between density, compressive stress and Kinoshita's hardness of compacted snow.

中に計測したものを示した。一般の路面圧雪の硬度は、密度の4乗に比例するとされているが(木下ほか, 1970), 本実験では直線に近い。これは圧雪密度が 0.4 g/cm^3 以下の試料の硬度を計測していないことに原因があると思われる。なお、各グループごとの人工圧雪試料の特性は、それぞれの切削実験グループのところで示す。写真6~8は、実験に使用した代表的な3密度群の試料の顕微鏡写真を示す。粒子の結合状況と密度の違いについては、この組織写真から明確な差を読みとることはできなかった。

2.4 切削試験設備と試験方法

切削試験試料は、3地区の圧雪試料を2.5の表5に示すように、それぞれのグループ分けを行った。その資料を、回転圧雪試験機(図3, 写真9)のテーブル上へ、4密度群12個(標準)の試料を接着した(写真10)。テーブルは、手で回転させることができ、切削刃を固定して、円周テーブル上の切削試料を回転移動させた。切削実験速度は $5 \sim 128 \text{ cm/sec}$ の範囲であった。

切削刃は、写真11, 表4に示す幅20~50mmの8種を用い、試験条件が変わるごとに、すくい面とにげ面を800~1000番砥石で整形し、三分力計に固定した。

三分力計は、写真12に示す支持板にとりつけた。支持板は、切削位置、切削深さを変化させるため、上下左右にハンドルで移動できる。水平ハンドルによって切削刃を横に移動させ切削深さを一定に設定すると、試料の幅と切削刃の幅により2回の切削試験ができる。切削深さは、上下ハンドルで自由に調整できる。実験の切削深さの範囲は1~15mmで、接着面の氷の影響が入らないよう、左右2条を支互にくり返し実験を続けた(写真13)。

2.5 試験の種類と切削条件

圧雪の切削抵抗は、密度、硬度、温度等のほか、切削深さ、切削速度、切削刃の寸法・形

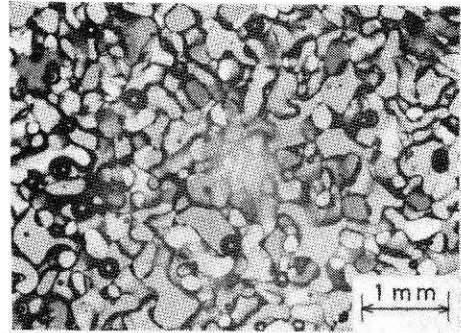


写真 6 圧雪試料の組織 ($A_{21} - 0.55 \text{ g/cm}^3$)
Photo. 6 Texture of the specimen with density 0.55 g/cm^3 .

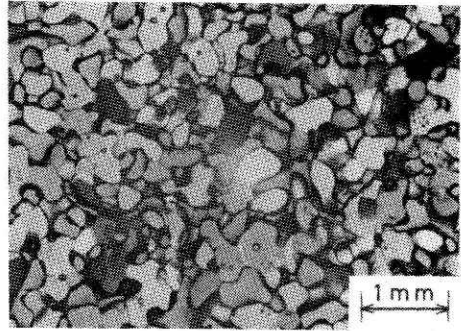


写真 7 圧雪試料の組織 ($A_{20} - 0.6 \text{ g/cm}^3$)
Photo. 7 Texture of the specimen with density 0.6 g/cm^3 .

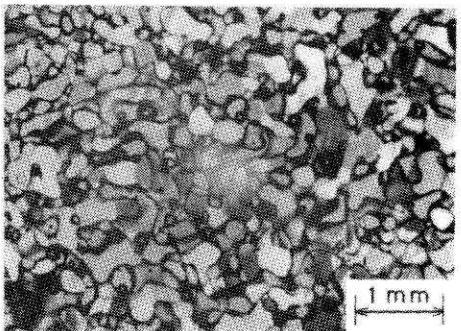


写真 8 圧雪試料の組織 ($A_{22} - 0.7 \text{ g/cm}^3$)
Photo. 8 Texture of the specimen with density 0.7 g/cm^3 .

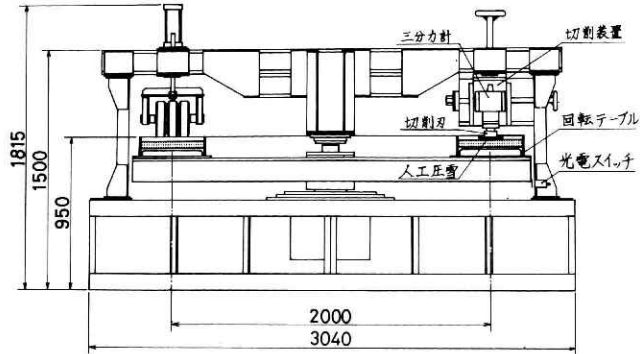


図 3 回転圧雪試験機

Fig. 3 Snow compacting machine with revolving table.

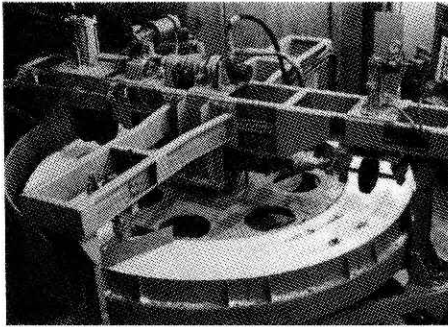


写真 9 回転圧雪試験機

Photo. 9 Snow compacting machine with revolving table.

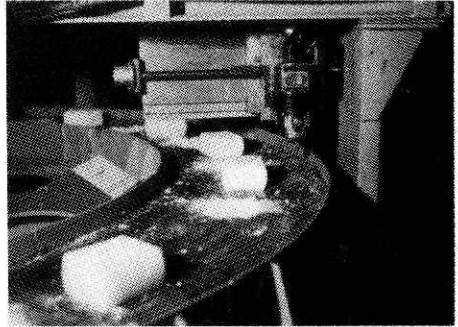


写真 10 回転テーブル上の圧雪試料

Photo. 10 Specimens on the revolving table.

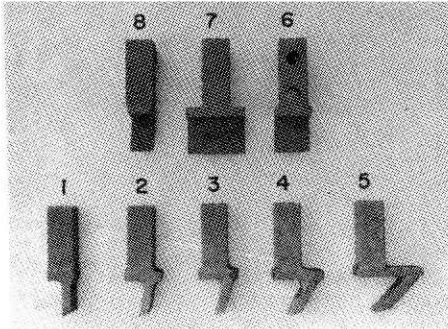


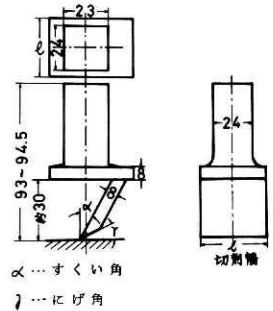
写真 11 切削刃

Photo. 11 Cutting blades.

表 4 切削刃寸法

Table 4 Specifications of cutting blades.

NO.	巾 mm	α 度	γ 度
1	30	0	15
2	30	13.5	15
3	30	18.5	15
4	30	32.5	15
5	29	47.0	15
6	30	29.0	15
7	50	34.0	15
8	20	32.5	15



状（すくい角，にげ角，切削幅，刃先厚さ，仕上状況）等の各種切削条件により大きく影響される。これらの条件のうち，2.4でのべたように，切削刃は，写真11，表4に示す切削幅20～50mmの8種を用い，4密度群12個1グループとして，表5に示す各実験組合せで実

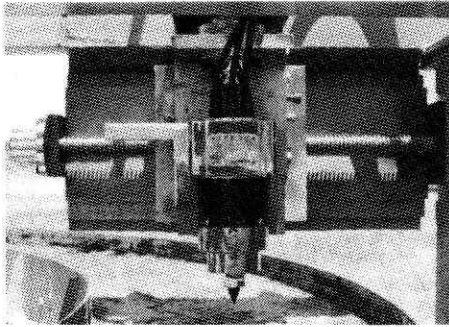


写真 12 三分力計と支持板

Photo. 12 Three-directional load-cell and its holder.

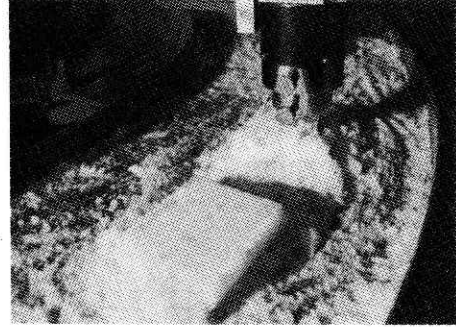


写真 13 人工圧雪の切削状況

Photo. 13 Cutting of compacted snow.

施した。実験は、あらかじめ一定切削深さを設定し、なるべく一定の切削速度（20～60 cm/sec）になるように、テーブルを回転させる方法をとった。

2.6 計測法

二次元切削の主分力（水平力）ならびに背分力（垂直力）の検出は、2.4に示す三分力計を用いた。円形テーブル上で試料が回転する関係で、送り分力（横方向）に円周側から回転中心の方向にわずかの力が検出された。回転テーブルの円周速度は、ボール紙で20mm間隔に切かきを作りテーブル側面に接着し、光電スイッチと組合わせてパルスの検出を行った。切削破壊力は、切削刃が試料のせん断面に亀裂を入れ、それをせん断しながら連続的に移動する。それに従って、三分力計で波状の応力が検出される。その応力は、切削刃のすくい角と形状、圧雪密度、切削深さ、切削速度等により大きく変化し、変動幅、変動ピッチも異なる。図4は、そのオシログラムを示したものである。

切削深さは、三分力計支持板の上下移動ハンドルの所にある回転目盛、ならびに、ノギスを併用して測定した。温度の測定には、すべてサーミスタ温度計を使用した。室温は、感温部を回転テーブル附近に設置した。圧雪温度は、感温部を回転テーブル上の圧雪接着面に設置し、テーブルの回転軸に取りつけたスリッピングを介して、温度記録計へ導いた。さらに、ダミー用として2個の圧縮用テストピースへ、それぞれの感温部を埋め込み、温度記録計へ導いた。表6に使用計測器と計測法を整理して示した。

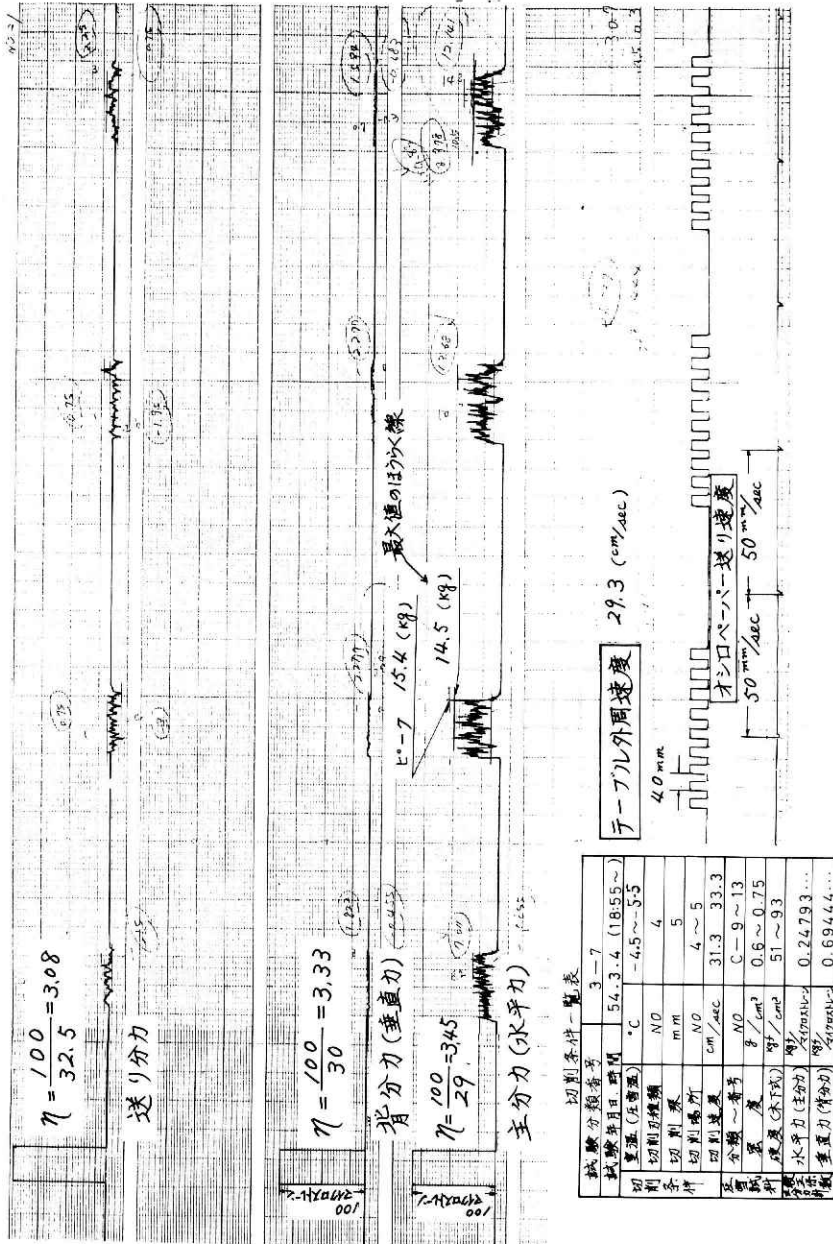
2.7 切削力読み取り方法

圧雪のせん断破壊時のオシログラムは、2.6でのべたように波状に検出される。人工圧雪の試料は、現地採雪、予備圧縮、運搬、保存、圧縮、整形、接着と一連の試料処理を経て切削試料として利用されるが、同一試料でも、まったく均一な組織としては存在しえない。したがって、各瞬間の切削破壊面の応力は変動があり、オシログラムには、ピーク値の異なる波形が連続的に表示される。また、実験は、まったく同じ場所の切削を再現することは不可能である。したがって、応力の読み取りは、切削破壊の波形の2～3のピーク値の包絡線の

表 5 切削実験行程表および実験条件の組合せ表 (S. 5.4. 2. 14 ~ (S. 5.4. 2. 14 ~ S. 5.4. 7. 31)
Table 5 Schedule of tests and combinations of experimental conditions.

採 取 分 類 試 料	採 取 年 月 日	試 料 圧 縮		切削用試料の整形接着		切 削 実 験		切 削 条 件				備 考 (試料, 計測状況)			
		年 月 日	個 数	密 度 範 圍 (g/cm^3)	年 月 日	個 数	テ ー プ ル 上 の 接 着 順 位	切 削 実 験 分 類	切 削 年 月 日	試 験 (%)	圧 雪 温 ($^{\circ}C$)		切 削 刃 (%)	切 削 深 さ (mm)	切 削 速 度 (cm/sec)
A ₁ (茶箱 6)	2/14	4/10	1~11	0.54~0.71 (12.7~38.2) (41~105)	5/7	13	2, 4, 6, 5, 8 9, 3, 10, 11, 13 1, 7, 12	4 A ₁₁	5/8	1~8	-5.8 -12.1 -16	4	3	286~632	13 個
										9~12		4	2, 4, 5, 6	186~37	2, 5, 3, 13, 1
										13~14		4	4	58~698	1, 7, 13
										15~20		4	3	232~414	4, 6, 8, 9, 10 1, 1, 12, 1
A ₂ (茶箱 6)	2/14	4/11	12~25	0.55~0.78 (13~54.4) (49~110)	5/14	12	21, 20, 15, 22 17, 24, 23, 16 25, 14, 19, 18	5 A ₂	5/15	-4	4, 5, 4, 1 5, 2, 3, 3	3	3	20~61	12 個
									13~20		3	3	21~67	12 個	
									19~26		3	3	28~71	12 個	
									5/17		3	3	21~65	7, 3	
A ₃ (茶箱 6)	2/14	2/27	1~10	0.45~0.64 (7.3~26.6) (38~91)	5/18	5	7, 3, 8, 1, 4	6 A ₃	6~13	-5.4	1, 5, 3, 4, 2	3	3	25~89	8, 1, 4
									14~16		7	3, 2, 4	23~41	8, 1, 4	
									17~32		4, A ₃ , B ₃	3	27~100	8, 1, 4	
									5/19 (~10:02)						
B (茶箱 3 3 4)	2/16	2/22	7~13	0.31~0.66 (2.2~31.7) (微小~80) (0.28~0.71)	2/24	12	1, 4, 6, 8, 9 10, 11, 14, 16 18, 24, 25	1 B ₁	予備	-4	4	25, 12	211~444	1, 16, 24 は剝離	
									1~4 (13:30~)		4	10, 5			
									2/28		4	5, 10	59~148	12 個	
									3/3 (21:30~22:30)		4	4	349~538	3	
C	2/27	3/4	1~9	0.55~0.75 (13.4~56.8) (3.0~100) (0.50~0.75) (8.7~56.4) (25~9.3)	3/4	15	1~15	3 C	3/4	-4.5 -5.5	4	3, 2, 4, 5, 6	21~42	15 個	
									10~13 (18:00 ~21:55)		4	3	4.7~1.28	15 個を 3 組 にわけ	
									14~23		5, 1, 3, 4, 2	3	198~462	15 個	

() の上段は圧縮応力範囲 (kgf/cm²) 下段は木下式硬度範囲 (kgf/cm²)



切削条件一覧表

試験分級番号	3-7
試験年月日	54.3.4 (18.55~)
室温 (室温)	°C -4.5~5.5
切削刃種類	NO 4
切削場所	mm 4~5
切削速度	cm/sec 31.3 33.3
分級番号	NO C-9~13
密度	g/cm ³ 0.6~0.75
硬さ (HV)	kgf/cm ² 51~93
水牙力 (圧分)	kgf/cm ² 0.24793...
垂直力 (圧分)	kgf/cm ² 0.69444...

図 4 切削試験オシログラム

Fig. 4 Pen-oscillograms obtained in cutting test.

表 6 計測準備作業および計測、測定機材と測定法

Table 6 Method of measurement and instruments.

作業項目 及び 測定項目	使用機械 及び 測定器	測定器(ビックアップ)仕様 (出力~容量~感度~精度)	測 定 法
採雪 及び 密度測定	スノーサンブラー	内径×長さ: 100×400mm (透明アクリル, 厚さ5mm)	山間地(表1)のしまり雪または新雪層へ, スノーサンブラーを水平に押し込んで採雪(写真1)。そのサンブラーにピストンを押し込み予備圧縮をして茶箱に入れて低温室へ保管。採雪層ならびに予備圧縮した圧雪の密度測定。
	はかり	測定範囲: 40~800g 最小目盛: 2g	
人工圧雪の 作成と 圧縮力の 測定	一軸圧縮試験機 (写真3, 表2)	電動CBB試験機改造 (谷藤機械LL) 最大荷重容量: 5 ton 圧縮速度: 0.1~500mm/min 内径×長さ: 101×170mm (鋳鉄製ニツ割り) (写真2)	低温室に保管してある圧雪試料を整形して圧縮試験機用半割りモールド(写真2)へ挿入し, -5℃の一定温度で一軸圧縮試験機を用いて数組の変位量に設定し, 定速度(10mm/min)の圧縮を行い, 数組の密度群の人工圧雪試料を作成(写真4)。圧縮力及び変位量は一軸圧縮試験機のビックアップの信号を計測室のX-Yレコーダへ記録した。
	一軸圧縮モールド		
試料整形	カンナ・ノコギリ	写真5	円柱型圧縮試料を平行に削り, 回転テーブルへ接着しやすいうよう整形。
切削力測定 及び 水平力 (主分力) 垂直力 (背分力) の検定 (図5, 6)	三分力計(工具動力計)(写真12) 回転圧雪試験機 (写真9, 図3)	三分力計 共和電業TD-300KA(AK9387) (主分力) 300kgf (背分力) 150kgf (送り分力) 200kgf	低温室の回転圧雪試験機のスライド式ホルダーに三分力計をとりつけ, 設定深さに保持し, テーブル上の圧雪を回転させ切削抵抗を測定(写真13)。三分力計の圧縮力の電気信号は, ケーブルにて計測室のストレインメータ及びペン書きオシログラフへ入力(図4)
	ストレインメータ の検定 (図5, 6)	共和電業DPM-8E(0~1000HZ) 渡辺測器リアコータWTR-281 (アンプ: WA294, ガルバノメータ: G12, ±20mm)	
切 削 スピード	光電ビックアップ (図4)	サンクス・RS-120HF-2	テーブルの外周へ巾20mmの切欠きを約10個作ったボール紙を張りつけ, 光電ビックアップをテーブルの横へ固定し, その出力を計測室へペン書きオシログラフへ入力。
切削深さ	スライド式 クロスヘッド	ハンドル目盛 1/80mm	ハンドル目盛とノギスを利用。 P試験のときは変位計を利用。
	変位計	昭和測器TCL-50F (容量: 0~50mm)	
圧雪硬度	木下式硬度計	先端貫入棒: 6φ おもり: 1kg 落下高さ: 主として20cm	試験条件が変わるごとに回転テーブル上に接着してある人工圧雪上へ木下式硬度計の貫入棒を置き測定。
圧雪温度	サーミスタ温度計	感熱部: タカラ工業YE-60 (-15~5℃: 2個, -30~10℃: 2個) 変換器: タカラ工業M3-2 (精度: ±1%FS) *: * E402 (*)	現地採雪時の気温, 雪温の測定。 回転テーブルの底面, 低温室各1, 及びダミー用圧雪2個へサーミスタ温度素子を設置し計測室の打点式温度記録計へ入力。
	温度記録計	千野製作所 EH800-06	
圧雪密度	はかり	日本オーハウス KO-1600 測定範囲: 0.1~2610g 最小目盛: 100mg	主として一軸圧縮後の円筒状試料の最終密度測定(写真4)
顕微鏡組	顕 微 鏡	日本光学 POH (偏光顕微鏡)	必要に応じて人工圧雪の組織写真の撮影(写真6~8)。
そ の 他	切削刃研磨	800, 1000番砥石	実験条件の変化ごとに切削刃のすくい面, けい面を砥石で研磨し, 条件を一定に保った。

平均値を読んで, その試料の最大切削力とした。図に示すように, 同一試料を同一条件で切削しても最大切削力には変動がみられる。

2.8 三分力計の検定

三分力計は, 工具動力計と称し, 主として金属材料の切削実験に使用されるものであるが,

本実験では、装着方法が異なるので、校正係数は仕様通りには使えない。そこで、図5、6に示すように、三分力計に実験用の切削刃を取りつけて検定を行った。計器特性により水平力に垂直力の影響が加わり、その値は垂直力の値の約 $6.7 \pm 1.3\%$ となり、真の水平力は図に示すとおり、三分力計の主成分の読みの1.04倍から垂直力の影響を差し引いたものとなる。したがって、垂直力が大きければ相殺され、三分力計の読みそのままが、ほぼ真の水平力として使用できるが、垂直力が比較的小さい場合は、主成分計の読みより4%大きい値が真の水平力となる。

本報告では、水平力を中心に解析したが、それに使用した水平力の値は、三分力計の値を修正しないでそのまま使用した。

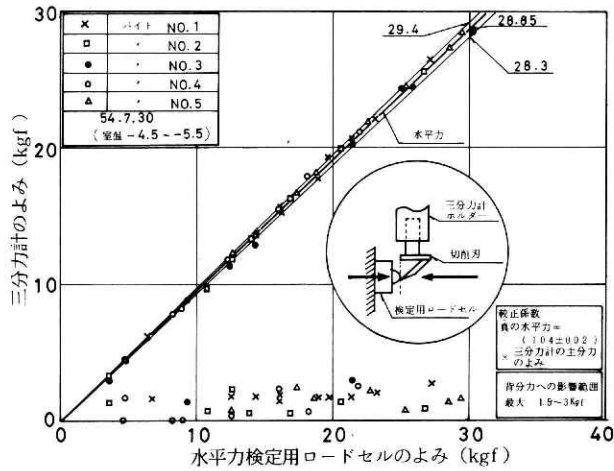


図5 水平力の検定(三分力計)

Fig. 5 Calibration of horizontal force (three-directional load-cell).

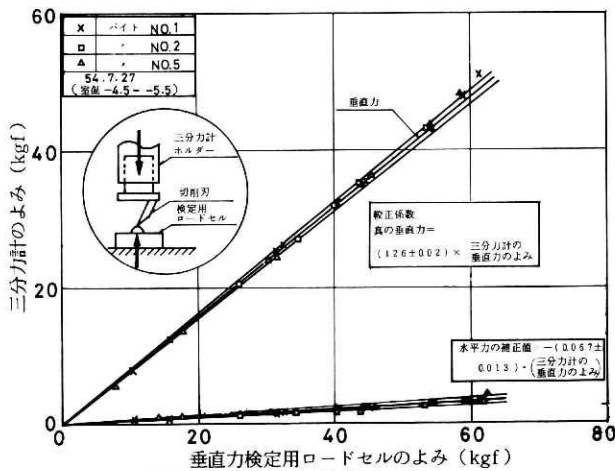


図6 垂直力の検定(三分力計)

Fig. 6 Calibrain of vertical force (three-directional load-cell).

3. 実験結果

3.1 実験結果の総括

実験は表5に示す切削条件で実施した。3ヶ所で採取した圧雪試料(A~C)を、それぞれ4密度群12個を一組にして、圧雪の密度、硬度、温度、切削深さ、切削刃の形状、切削速度の影響等それぞれ条件を変えて切削実験を実施し、それらの条件と水平切削抵抗の関係を調べた。水平切削抵抗は、圧雪密度の影響が大きいので、グラフの解析は主として横軸に密度を採用した。

以下に、各圧雪試料グループ別に切削実験結果を示した。表7は、それらの結果を解析項目別に整理し、それぞれの特性を比較しやすいようにしたものである。

表 7 切削実験結果の一覧表
Table 7 The whole results of experiments.

解析項目	図番	切削実験順位	試料分類	試験日	圧雪温(℃)	切削刃 β	切削深(mm)	横軸基準	縦軸基準	備考
圧雪試料特性	2	1~6	A,B,C	2/21 ~4/11	-4.5 ~-5.5	-	-	圧雪密度	圧縮応力 硬度	図-7,10,15 の合体
"	7	1,2	B	2/21~23	"	-	-	"	"	図-15と硬度 特性ほぼ同一
"	10	3	C	3/3~4	"	-	-	"	"	図-7と圧縮特性 ほぼ同一硬度小
"	15	4~6	A	2/27 4/10~11	"	-	-	"	"	
"(まとめ)	25	-	A,B,C	上記主 なデータ	"	-	-	一軸圧縮 応力	硬 度	図-27参
圧雪温度(4段階)	16	4	A ₁₁	5/8~9	-5.5 ~-1.6	-	-	圧雪密度	"	
"(5段階)	17	4	A ₁₁	5/10~11	-1 ~-1.6	-	-	"	"	
"(")	18	4	A ₁₁ (4種)	5/10~11	-1 ~-1.6	-	-	圧雪温度	"	
圧雪硬度	27	-	A ₁ ,A ₁₁ B ₂	主 な デ ー タ	-5 ~-1.6	4	-	硬 度	水平比 切削抵抗	
切削深さの変化(3段階)	8	1	B ₁	2/25	-4.5 ~-5.5	4	5~12	圧雪密度	水 平 切 削 抵 抗	
"(5段階)	9	2	B ₂	2/28 3/3	-5	4	3~10	"	"	
"(5段階)	11	3	C	3/4	-4.5 ~-5.5	4	2~6	"	"	図-9より 30%小
切削刃の変化(すくい角4種)	12	3	C	3/4	-4.5 ~-5.5	1,3 ~5	3	"	水平比 切 削 抵 抗	圧縮応力の グラフ
"(" 5種)	21	5	A ₁₂	5/15	-4.5 ~-5.5	1~5	3	"	"	図-28参
"(" 3種)	23	6	A ₂	5/18~19	-4	3~5 7,8	3	"	"	
"(" 5種)	24	6	A ₂ (2種)	5/18~19	-4	1~5	4	すくい角	"	
切削刃の変化(まとめ)	28	-	A ₁₂ ,C A ₂	-	-4 ~-5.5	1~5	3~4	"	比 率	図-12,21,23 ~24のまとめ
切削刃及び、温度変化(切削刃5種,温度変化4段階)	22	5	A ₁₂	5/15~17	-8 ~-1.6	1,2,3,5	3	圧雪密度	水平比 切 削 抵 抗	温度変化 すくい角変化
圧雪温度変化(4段階)	20	4	A ₁₁	5/8~9	-5.5 ~-1.6	4	3	"	"	
"(")	19	4	A ₁₁ (3種)	5/9~11	-4 ~-1.6	4	3	圧雪温度	"	
切削速度の変化	13	3	C	3/4	-4.5 ~-5.5	4	3	圧雪密度	水平比 切 削 抵 抗	図-14 オンプログラム

3.2 圧雪試料（第1回圧縮グループ）の切削抵抗

図7は、2月21日～23日第1回目の圧縮グループ（試料B）の試験試料の特性図である。密度範囲は、0.28～0.71 (g/cm³) の広い範囲にわたっている。この資料を使用し、切削刃 No. 4（すくい角 32.5度）を用いて、深さ 3～12mm の切削実験を行った。実験結果を図8、9に示す。水平切削抵抗は、密度増大に対して、指数関数的に増大する（密度の3～4乗に比例）。切削深さの変化と水平切削抵抗の変化は、ほぼ一次関数で示される。図8と図9では、圧雪試料グループが異なり、切削抵抗曲線の曲率が異なるが、切削深さ 5 mm ではよく一致する。図8の切削深さ 10, 12 mm では、切削力の変動も大きく、データが少ないこともあって、図9と一致しない。この実験グループは、試料内にざらめ雪、氷がまじり、他のグループとくらべ、同一密度に対して硬度が少し高いグループである。したがって、切削抵抗も全体に高くなっている。

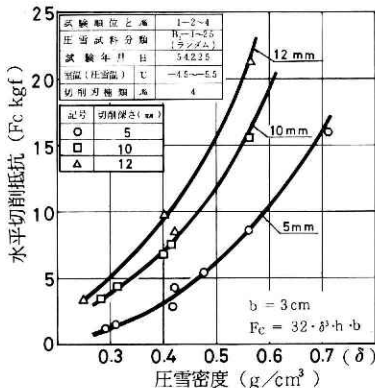


図8 切削深さの変化と水平切削抵抗
Fig. 8 Relation between cutting depth and horizontal cutting resistance.

3.3 圧雪試料（第2回圧縮グループ）の切削抵抗

図10は3月3～4日第2回目の圧縮グループ（試料C）の圧雪切削試験試料の特性図である。3カ所の採取試料の中で、同一密度に対して硬度が最も小さい。これは、

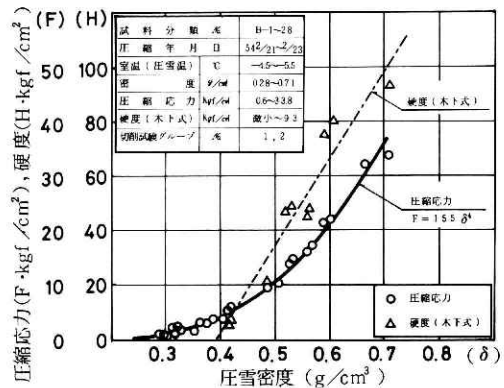


図7 圧雪密度と圧縮応力および硬度の関係（試料B）
Fig. 7 Relation between density, compressive stress and Kinoshita's hardness of compacted snow (sample B).

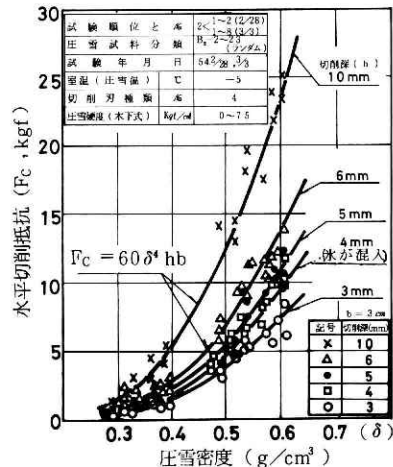


図9 切削深さの変化と水平切削抵抗
Fig. 9 Relation between cutting depth and horizontal cutting resistance.

採取時に上層部のざらめ層により圧密され、かつざらめ化していたしり雪層から採取したため、試料の最終圧縮密度の範囲は、 $0.5 \sim 0.75 \text{ g/cm}^3$ で比較的密度の大きい試料が多い。

図11は、図8、図9と同じく、切削刃No. 4を用いて、切削深さ2～6 mmの切削実験を行ったものである。水平切削抵抗は同一傾向を示しているが、横軸を密度基準で示すと、硬度が小さいためか、図9に比べ全体に30%程度小さい値を示している。実験式を計算してみると、水平切削抵抗は密度の3乗に比例している。

図12は、同一条件で、すくい角の異なる5種類の切削刃による切削実験結果である。すくい角の変化により、圧雪試料の破壊面のせん断角が変化し、破断面積の違いにより、水平比切削抵抗は大きく変化する。切削刃No. 1は、No. 5のほぼ2.5倍の水平比切削抵抗となる。切削刃No. 2の試験は、切削試料面が接着面に近く、圧雪組織内に氷粒を含み、同一試料であっても密度ならびに硬度の変化があったものと思われる、最初の試験よりかなり高い値となっていた。

図13は、切削速度を4.7～128 cm/secに変化させたときの、水平比切削抵抗の違いを示したものである。低速では、ばらつきが大きく、わずかに値が大きくなっているが、明らかな差は認められない。したがって、一般の切削実験結果の整理は、特に低速、高速の場合以外は切削速度は無視した。図14は、同一試料について切削速度を変えたとき、水平切削抵抗のオシログラムの波形を示したものである。高速切削では、連続した波形のピークが、低速

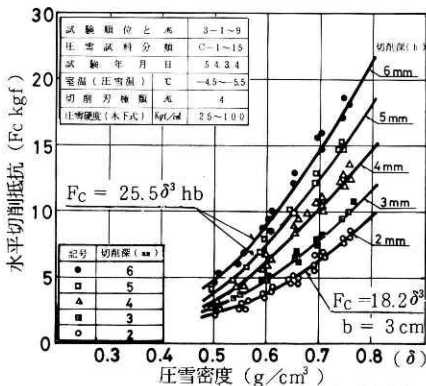


図 11 切削深さの変化と水平切削抵抗
Fig. 11 Relation between cutting depth and horizontal cutting resistance.

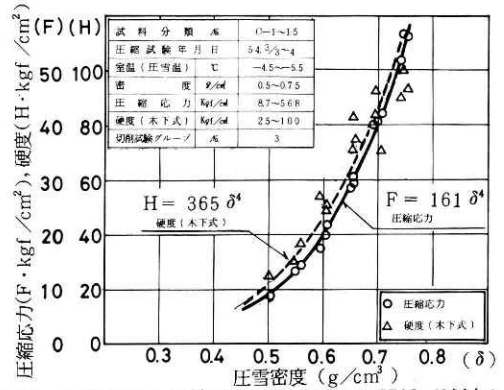


図 10 圧雪密度と圧縮応力および硬度の関係(試料C)
Fig. 10 Relation between density, compressive stress and Kinoshita's hardness of compacted snow (sample C).

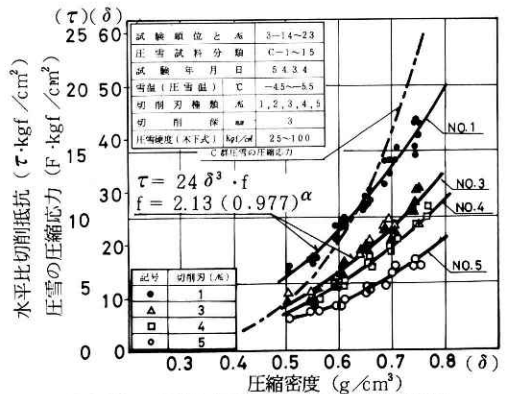


図 12 切削刃の種類と水平比切削抵抗
Fig. 12 Variation of unit horizontal cutting resistance by different cutting blades.

にくらべわずかに小さくなっている。低速では、大小の、のこぎり刃状の波形が連続している。

3.4 圧雪試料（第3回圧縮グループ）の切削抵抗

図15は、4月10日～11日の第3回圧縮グループ（試料A₁）と2月27日の圧縮試料（試料A₂）の圧雪切削試料の特性図である。第1回圧縮グループとはほぼ同じ圧縮応力、ならびに硬度特性曲線を描く。密度範囲は、0.45～0.78 g/cm³で、第1回圧縮グループより密度の高い試料が多い。

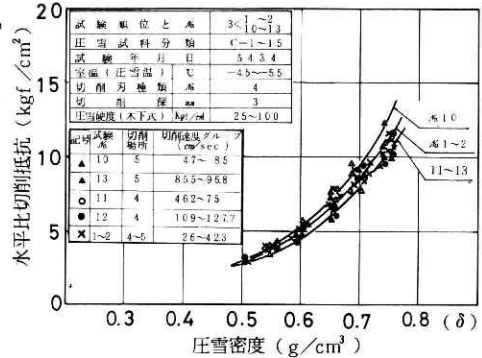


図 13 切削速度の変化と水平比切削抵抗
Fig. 13 Variation of unit horizontal cutting resistance by different cutting speeds.

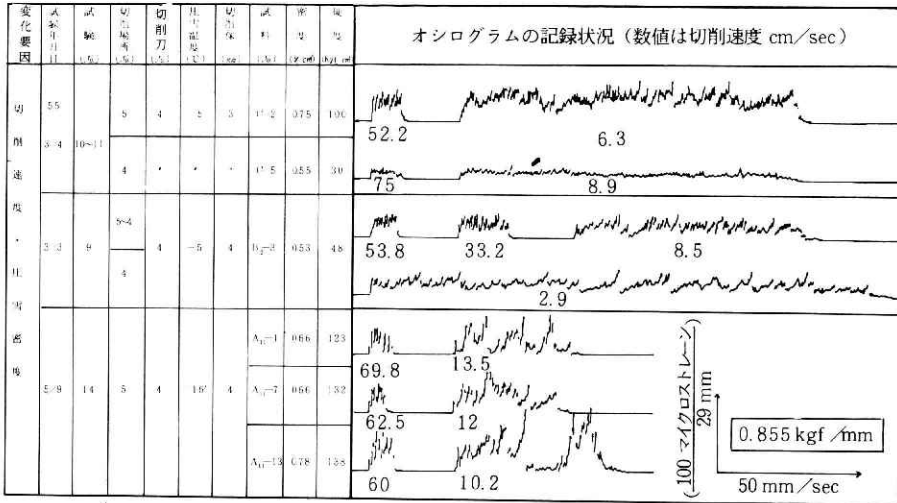


図 14 低速ならびに高速切削時のオシログラム
Fig. 14 Pen-oscillograms of cutting resistance (several speeds).

図16, 17は、第3回圧縮グループ（試料A₁）の実験試料を、各温度条件を変化させながら切削実験を行い、その直後圧雪硬度を測定した時の試料の温度と硬度の関係を示したものである。密度変化に対し硬度は大きくなっているが、指数関数的に増大していない。これは、図15に示すように、A₁試料の圧雪硬度上昇率が、高密度で小さいためと思われる。

図18は、4種類の圧雪試料について、上記と同様の方法により測定したときの温度と硬度の関係を示したものである。硬度は、温度低下によりなだらかな上昇曲線を描いている。

図19は、図18の試料の同条件による温度と水平比切削抵抗の関係を示したものである。曲線の形状は同様であるが、硬度に比べて低温度における上昇率が小さい。切削抵抗は、密度依存性が非常に強いが、温度変化にも影響されることがわかる。

図20は、図19の試料に他の試料を加えて、密度基準による、温度変化と水平比切削抵抗の

関係を示したものである。各試料ごとの温度の影響はわかるが、全体としての傾向は、試料によっては同一密度でも硬度の小さい試料があり、硬度による影響が大きく出て、変動が大きく、温度による影響は明確ではない。

図21, 22は、試料グループA₁₂の切削実験結果である。図21は、A₁₂試料を各種の切削刃を用いたときの水平比切削抵抗を密度基準で示したものである。図12にはほぼ重なり、実験式は、密度の3乗に比例する式がよく適合する。切削刃No. 1の変動が多く図12にくらべ少し大きい。同様に、切削刃No. 5は、圧雪密度の大きい試料の抵抗が小さくなっている。これは、密度の大きい試料グループで、硬度の上昇率が小さいためと思われる。図22は、切削刃の違いと圧雪温度違いによる水平比切削抵抗の変化を密度基準で同時に示したものである。切削刃の違いによる切削抵抗変化は、同様に大きい。温度による影響は明確に現われていないものもある。曲線は、切削刃No. 5を基準にした実験式で計算した位置(点線)とかなりずれている。

図23, 24は、A₂試料の切削実験結果である。図23は、図12, 21, 22と同様に、切削刃の変化と水平比切削抵抗の実験結果である。切削刃No. 5は、図12によく一致しているが、No. 4, No. 3は約20%大きい。切削刃No. 7, 8の形状は、No. 4と同一であるが、切削幅がそれぞれ50, 20mmのものである。水平比切削抵抗は、No. 4と大きな違いはない。図24は、2種類の試料について、5種類の切削刃の、すくい角の変化と切削抵抗の関係を調べ、その結果をすくい角基準で示したものである(図12, 21, 22, 23参照)。

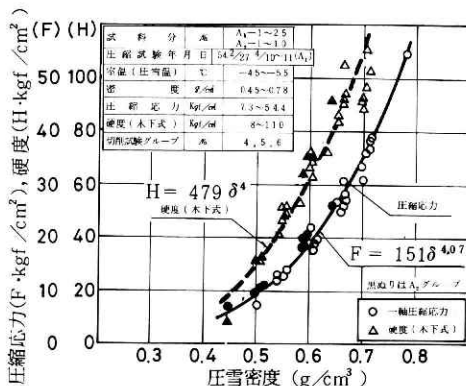


図 15 圧雪密度と圧縮応力および硬度の関係 (試料 A)

Fig. 15 Relation between density, compressive stress and Kinoshita's hardness of compacted snow (sample A).

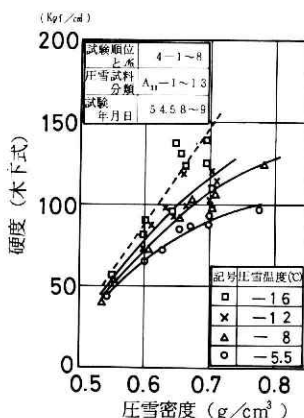


図 16 圧雪温度の変化と硬度

Fig. 16 Relation between temperature and hardness of compacted snow.

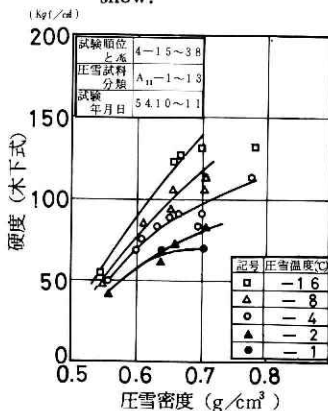


図 17 圧雪温度の変化と硬度

Fig. 17 Relation between temperature and hardness of compacted snow.

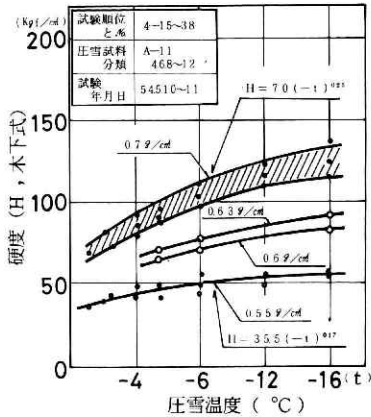


図 18 圧雪温度と硬度
Fig. 18 Relation between temperature and hardness of compacted snow.

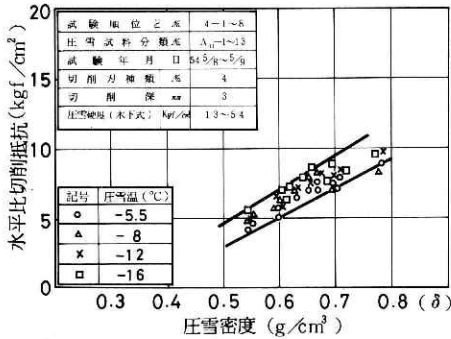


図 20 圧雪の温度変化と水平比切削抵抗
Fig. 20 Relation between temperature and unit horizontal cutting resistance.

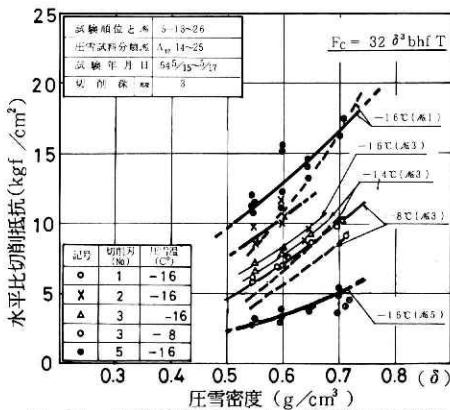


図 22 圧雪温度の変化および切削刃の種類と水平比切削抵抗
Fig. 22 Variation of unit horizontal cutting resistance by the temperature of compacted snow and cutting blades.

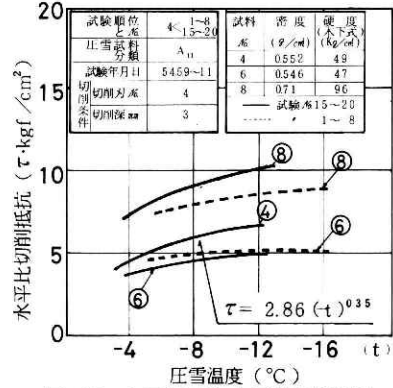


図 19 圧雪温度と水平比切削抵抗
Fig. 19 Relation between temperature and unit horizontal cutting resistance.

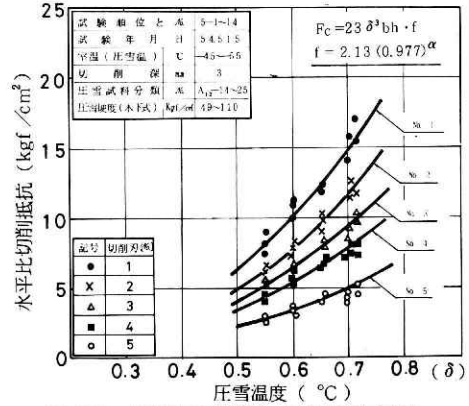


図 21 切削刃の種類と水平比切削抵抗
Fig. 21 Variation of unit horizontal cutting resistance by different cutting blades.

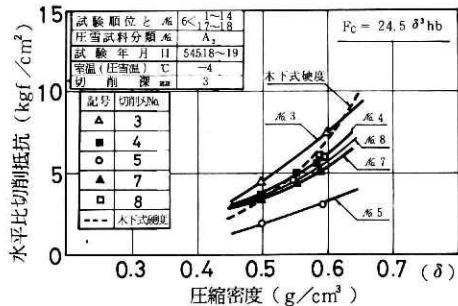


図 23 切削刃の種類と水平比切削抵抗
Fig. 23 Variation of unit horizontal cutting resistance by different cutting blades.

4. 考 察

4.1 人工圧雪の力学的性質

4.1.1 圧縮応力と密度について

雪を一軸圧縮試験機で圧縮（速度10mm/分）した，人工圧雪試料の密度と圧縮応力，ならびに，硬度の関係を示したものが図2である．異なる三場所の雪質にもかかわらず，圧縮応力と密度の関係はほぼ一致し，圧縮応力は，密度の4乗に比例している．図25は，前記3試料グループの特徴を見るため，一軸

圧縮応力と硬度の関係を調べたものである．圧縮応力の大きいところで硬度の上昇率が小さくなっているが，圧縮応力と密度曲線は，なめらかな上昇曲線を描いているので，高密度の試料の組織構造のもろいものがあったか，（A，C 試料），硬度測定器の特性が原因と思われる．

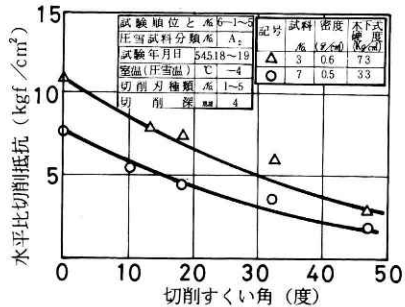


図 24 切削すくい角の変化と水平比切削抵抗
Fig. 24 Variation of unit horizontal cutting resistance on different back-rake angles of blade.

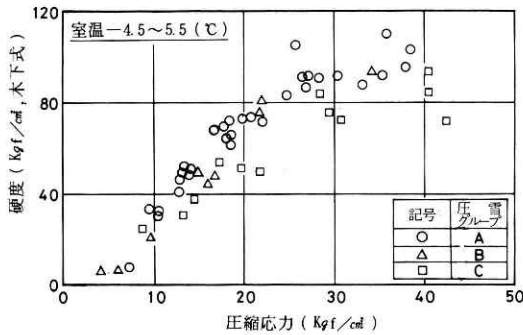


図 25 圧雪の圧縮応力と硬度
Fig. 25 Relation between compressive stress and Kinoshita's hardness.

4.1.2 密度と硬度について

圧雪の切削破壊応力は，雪の粒子，または結晶状の氷粒が，網目状に密に結合している状態を分断するので，密度の高い圧雪ほどせん断応力は増大する．図2，7，10，15～17は，木下式硬度計により，各切削試験ごとに測定した試料グループの，硬度と人工圧雪密度の関係を示したものである．圧雪の硬度と密度の一般的傾向は，密度が大きくなるに従い硬度が上昇し，密度 0.5 g/cm³付近で急上昇するので，全体の傾向として，上方に凹な指数関数の関係で示される．本測定では，測定条件を一定にするため，硬度測定に6φの貫入棒を統一して使用したので，密度の軟い範囲の試料の硬度が欠測値となっている．また，前節で検討したように，高密度部分で硬度が指数関数的に増加せず，全体として直線的な関係がみられる．圧雪の硬度は，密度の4乗に比例する実験式が提示されているが（木下他，1970），欠測値を推定して実験式を計算してみると，図10，15に示すように密度の4乗にほぼ比例することがわかる．圧雪の硬度は，試料片の上層より左右二条を順番に切削し，その切削面を測

定するので、同一場所の再現は不可能であり、硬度測定値のばらつきの原因となったと思われる(写真13)。

4.1.3 雪温と硬度について

一般に、圧雪の温度低下により硬度が増すと報告されているが⁽²⁾、今回の試験温度範囲は、0～-16(C°)を7段階に設定し、それぞれの切削条件ごとに硬度測定を行った。圧雪温度と硬度の関係は、図18に示すとおり指数曲線状に上昇し、0°Cに接近するに従い低下し、全体として上方に凸な上昇曲線を描く。

4.2 切削理論の導入

圧雪の切削メカニズムを検討するために、金属材料の切削理論の導入を試みた。金属材料を切削するとき、切りくずの生成状態は、流れ形、せん断形、裂断形、および、き裂形の4種に大別されている。せん断形は、被削材料がいくぶんもろく、せん断すべりを生じやすい金属材料にみられる切削状態で、塑性変形に続くすべり破壊によって、切りくずの一塊が生じ、この過程が一定のピッチで繰返される。一般に大切削厚さ、小さく角の場合のほか、切削装置の剛性が低い切削条件で発生しやすいといわれている。き裂形は、ぜい性材料(硬質プラスチック、普通鉄)などにみられる形態で、刃先から工作物表面まで瞬間的にぜい性き裂(脆性亀裂)が発生し、切りくずは、ほとんど塑性変形を受けないといわれている。

今回の実験の観察結果から、人工圧雪の切削形態は、せん断形とき裂形である。0°Cに近い圧雪は、比較的軟く、薄く切削する場合は、せん断形となり、低温のかたい圧雪とか、密度の大きい圧雪、氷盤、氷等の切削の場合はき裂形によく似ている。

切削模型として、図26に示すように、刃先から被削材上面に向かって広がるせん断域を不連続面とみなし、二次元変形域を無視し、理想化された変形を考えた、流れ形切りくずの二次元切削抵抗 R を導く、せん断面切削模型が考えられている。そのときの平面A-Bをせん断面と呼び、切削力は F_c と F_t に分けて測定される。切削刃が被削物を引裂く力と切りくずの慣性力を無視すれば、 R は切削力 R' と平衡し、図26の幾何学的関係から以下の式が導かれている。

$$\tan \phi = r_c \cos \alpha / (1 - \sin \alpha) \quad (1)$$

$$\tan \beta = (F_t + F_c \tan \alpha) / (F_c - F_t \tan \alpha) \quad (2)$$

$$\tau_s = F_s \sin \phi / b t_1 \quad (3)$$

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

$$F_t = \tau_s \cdot b \cdot t_1 \sin(\beta - \alpha) / \sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) \quad (5)$$

ここに、
 α : 切削刃のすくい角
 t_1 : 切削厚さ(深さ)
 t_2 : 切りくず厚さ
 r_c : 切削比 ($r_c = t_1 / t_2$)

- ϕ : せん断面と切削方向のなす角 (せん断角)
- F_o : 切削刃進行方面分力 (主分力)
- F_t : 切削刃方向の分力
- β : 切削刃すくい面の平均摩擦角 ($\mu = \tan \beta$)
- τ_s : せん断面の平均せん断応力
- b : 切削幅

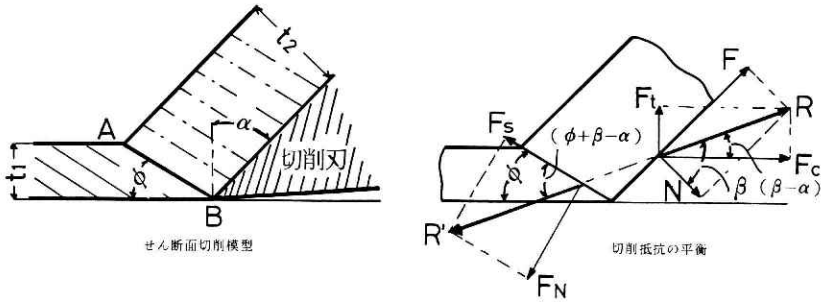


図 26 二次元切削抵抗模型 (機械工学便覧による)
 Fig. 26 Model of two-dimensional cutting resistance.

上式から、圧雪の切削抵抗が金属材料と同様の切削形態をとるとすれば、式(4)から水平切削抵抗が導かれる。その力は、圧雪の特性 τ_s と切削幅、切削深さ、切削すくい角、切削状況(せん断角 ϕ 等)、すくい面の摩擦角等に影響されることがわかる。実際の切削・破壊は、圧雪の内部組織の不均一、すくい面の摩擦角の変動等複雑に変化し、仮定に基づく単純な模型どおりには切削されていないので、この式をそのまま導入するには適しないが、実験結果より式の一部が導入できるので、この式を検討しながら結果の解析を試みた。

4.3 人工圧雪の力学的性質と比切削抵抗

4.3.1 雪温と比切削抵抗

圧雪の温度変化と比切削抵抗は、図19に示すように低温では上昇率は小さい。硬度変化と同様に、低温から 0°C に近づくにしたがい、硬度の低下率は大きくなるので、全体として上方に凸の曲線となる。気温が 0°C 以上になれば、氷の融解が始まり、圧雪は軟化し硬度は急激に低下する。 0°C 以上の気温にさらされる圧雪の熱収支とその平衡状態は、不安定で条件設定とその解析は非常に困難であるので、 0°C 以下における圧雪の温度と切削強度の実験を実施した。実験式は、図19から、温度補正係数 T の式として、温度影響曲線を式(6)に示した。

$$T = 0.57 (-t)^{0.35} \quad (6)$$

ここに

T : 切削抵抗温度補正係数 ($t = -5^{\circ}\text{C}$ 基準)

t : 室温 (切削時の圧雪の温度, 0°C)

4.3.2 密度と比切削抵抗

圧雪の比切削抵抗は、図8, 9, 11, 12, 21~23に示すように、圧雪密度の指数関数で示される。実験式は、B 試料で圧雪密度の4乗に比例する式が適合する(図9)。高密度で硬度上昇割合が小さいA, C 試料では、圧雪密度の3乗に比例する実験式が適合する。今回の実験条件の中では、圧雪密度が水平切削抵抗に最も大きな影響を及ぼしている。気温-5°C No. 4 切削刃を基準にして、圧雪密度と比切削抵抗の関係を示す実験式は、(7)式で示される。

$$\tau = K \delta^n \quad (7)$$

ここに τ : 単位垂直切削断面積当りの切削力 (kgf / cm²)

K : 係数, 雪質, 硬度特性等圧雪の性質により異なる。

δ : 圧雪密度 (g / cm³)

n : 切削材料の密度と強度特性によりきまる。

4.3.3 硬度と比切削抵抗

圧雪の硬度測定(木下式)と切削刃による切削破壊は、圧雪組織に対して類似の力学的効果を及ぼしているので、両者の関係について検討してみた。図27に示すように、圧雪硬度100 kgf/cm²までは、ばらつきは多いがほぼ直線関係にある。圧雪硬度が120 kgf/cm²を超えているデータは、室温を-10°Cに保ったときの試験値であり、圧雪硬度に対する比切削抵抗の上昇率が低下しているが、温度低下による圧雪の硬度特性と切削特性が異なると思われる。

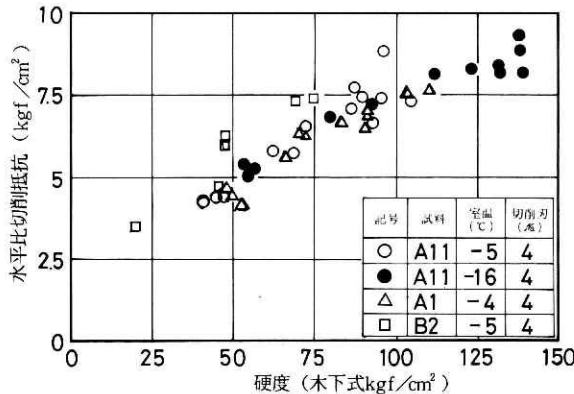


図 27 硬度と水平比切削抵抗
Fig. 27 Relation between Kinoshita's hardness and horizontal cutting resistance.

4.4 切削刃の形状と比切削抵抗

4.4.1 すくい角の変化と比切削抵抗

図12, 21~24は、すくい角の異なる5種類(一定幅30 mm)の切削刃による切削試験結果である。式(1)~(4)で明らかのように、すくい角が大きい程、せん断角が大きくなり水平切削抵抗力は小さくなる。No. 5の切削刃による圧雪のせん断切りくずは小さく、切削抵抗 F_c の変動幅が小さい。理論式(4)に従えば、 ϕ と β が測定値から計算できるが、本実験では、あら

はじめ一定深さに設定した切削実験であり、垂直力が非常に小さかった。また、 β は単純なクーロン摩擦ではなく、すくい角の変化で大きく変動するといわれている。したがって、計算式で求める事は困難であり、図12, 21~24の実験結果から、すくい角 0° を基準にして示したものが図28である。この関係を指数曲線で推定し、圧雪の切削抵抗のすくい角補正係数 f の式として、No. 4切削刃 ($\alpha = 32.5$ 度)を基準に、すくい角影響曲線を8式に示した。

$$f = 2 \cdot 13 (0 \cdot 977)^{\alpha} \quad (8)$$

ここに f : 圧雪切削抵抗のすくい角補正係数
 α : すくい角 (度)

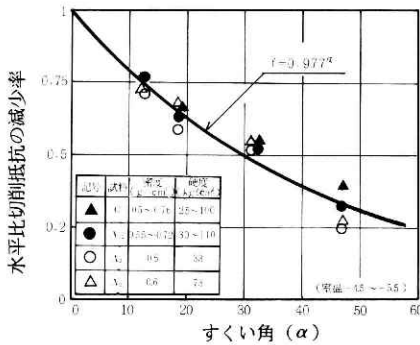


図 28 すくい角と水平比切削抵抗の変化率
 Fig. 28 Proportion of unit horizontal cutting resistance of different rake angles of each blade.

4.4.2 切削幅と比切削抵抗

切削幅の変化に対する切削抵抗は、式(4)によれば切削幅に対して一次式で示される。実験の結果、切削幅20~50 mmの3種の切削力による比切削抵抗は、図23に示すようにほぼ一致する。したがって、式(4)の切削幅 b がそのまま適用できる。

4.5 切削条件と比切削抵抗

4.5.1 切削速度と比切削抵抗

圧雪のせん断抵抗 τ_c は、一般に密度、温度条件の他、ひずみ速度にも影響されると思われるので、切削速度の変化について実験してみたが、図13, 14に示すように、本実験範囲(5~128 cm/sec)では、20 cm/sec以下でピーク値が大きくなる傾向があるが、明らかな相違はみられなかった。したがって、データ整理ならびに解析は速度条件を無視した。

4.5.2 切削深さと比切削抵抗

切削深さの増大は、式(4)によって破断面の増大をもたらす切削抵抗は増大する。図8, 9, 11から切削抵抗を比較すると、ほとんど変化はみられない。切削深さは、切削抵抗に対して線形関係にあるものと思われる。図8は、データが少ないので明確な比例関係は見られないが、図9, 11は、密度基準に対する水平切削抵抗を示す各実験式の係数が、切削深さと明確な比例関係にあることを示す。

5. ま と め

今までの実験結果ならびに式(1)~(4)を利用して、圧雪の水平切削抵抗と各種切削条件の関係をまとめると、次のようになった。圧雪の水平切削抵抗は、圧雪特性（硬度、密度）により大きく影響される。その関係を密度基準で示すと、密度の3~4乗に比例する実験式がよく適合する。水平切削抵抗と切削幅、切削深さの関係は、線型関係になる。水平切削抵抗は、すくい角が小さくなるに従い、すくい角 α 度の修正指数曲線状になだらかに上昇する。同様に、温度低下とともに指数曲線状に上昇する。切削刃先端の性状は、摩擦角、せん断角の変動をもたらし、水平切削抵抗に影響を及ぼすことが定性的に明らかとなったが、数値化できなかった。切削速度は明確な変化が見られなかった。

上記結果を、実験数が多かったNo. 4切削刃（すくい角32.5度）による室温-5°Cの切削データを中心に整理すると、式(9)~(13)の一般式で示される。

$$F_c = \tau \cdot h \cdot b \cdot f \cdot T \quad (9)$$

$$\tau = K \delta^n \quad (10)$$

$$f = 2 \cdot 13 \times (0.977)^\alpha \quad (11)$$

$$T = 0.57 (-t)^{0.35} \quad (12)$$

$$P_c = F_c \cdot V / 270 \quad (13)$$

- ここに
- F_c : 水平切削抵抗力 (kgf)
 - τ : 単位切削断面積当りの水平切削抵抗力 (kgf/cm²)
 - K : 実験式による係数で $K = 32$ (図8), $K = 60$ (図9), $K = 25.5$ (図11)
 - n : 切削材料の密度と強度特性によりきまる定数で $n = 3$ (図8, 11, 12), $n = 4$ (図9)
 - δ : 圧雪密度 (g/cm³)
 - h : 切削深さ (cm)
 - b : 切削幅 (cm)
 - f : 切削抵抗のすくい角補正係数 ($\alpha = 32.5$ 度基準)
 - α : 切削刃のすくい角 (度)
 - T : 切削抵抗の温度補正係数 ($t = -5^\circ\text{C}$ 基準)
 - t : 室温 (°C), 本実験では室温と圧雪温度がほぼ一致していた。
 - P_c : 切削仕事率 (PS)
 - V : 切削速度 (km/h)

切削抵抗と密度の関係を示す図8~9, 11, 図21の関係式を整理し、それらの関係から、圧雪密度と単位切削断面積当りの水平切削抵抗力を式(10)で計算し、図化したものが図29であ

る。いま、基準値として、気温 -5°C 、すくい角 32.5 度、切削深さ及び切削幅 1 cmをとり、それらの数値を(9)~(12)式に代入して計算した結果を、水平切削抵抗 F_c を計算する単位切削抵抗とすれば、図29の $\tau-\delta$ の関係式の縦軸の単位を kgf ($F_c-\delta$)に置きかえて読み取ることができる。また、式(13)の右辺 F_c に図29から読みとった値(kgf)と単位切削速度 $V=1$ km/h の値を代入して計算したときの人工圧雪の切削速度 $5-128$ cm/sec ($0.18-4.61$ km/h)における $P_c-\delta$ の関係は、図30に示される。この図から、切削条件(切削速度、切削幅、切削すくい角)、温度条件、圧雪条件等がきまれば、前記条件における切削仕事率(水平切削抵抗成分)の計算ができる。

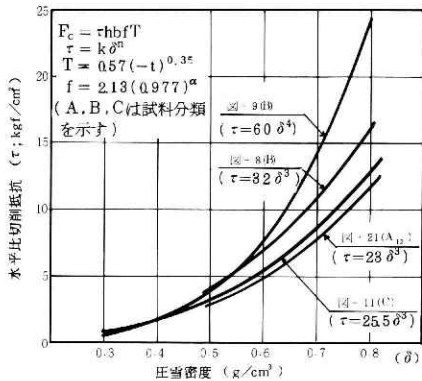


図 29 単位水平比切削抵抗の計算図

Fig. 29 Diagram for calculating unit horizontal cutting strength of compacted snow.

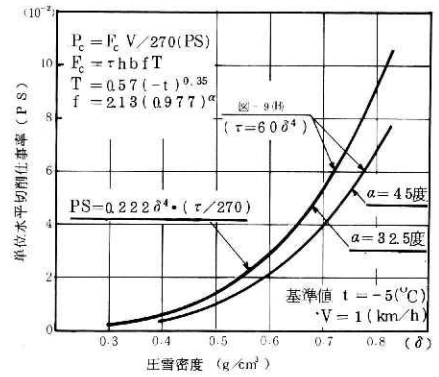


図 30 単位水平比切削仕事率の計算図

Fig. 30 Diagram for calculating unit horizontal cutting power of compacted snow.

あとがき

低温室での人工圧雪の切削実験の結果、切削抵抗に影響を与える条件と、人工圧雪の力学的諸性質との関係を、実験式として求めることができた。

路面圧雪の切削上の問題で、今後実用上必要とされるもののひとつとして高速切削がある。時速 20 km/h あるいはそれ以上の高速域での切削には、多様に変化する路面圧雪の力学的性質との関係を求める切削機構が解明されなければならないが、この研究はその際の有用な手がかりを与えるものと考えている。

おわりに、本稿の作成にあたり、雪害実験研究所栗山弘所長、野原以左武第3研究室長から有益な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 機械工学使覧(改訂第6版)第4章, 工作機械. 119-121.
- 2) 木下誠一(1960): 積雪の硬度(I). 低温科学, 物理篇, 第19輯, 119-134.
- 3) 木下・秋田谷・田沼(1970): 道路上の雪氷の調査Ⅱ. 低温科学, 物理篇, 第28輯, 311-323.
- 4) 小林俊市(1978): 圧雪硬度の温度および密度による変化. 国立防災科学技術センター研究報告, 第20号, 267-291.
- 5) 田中・野原・岡崎・小山(1974): 路面圧雪処理に関する研究. 防災科学技術総合研究報告, 第33号, 5-54.

(1981年7月3日 原稿受理)