



Title	斜面積雪の内部歪 I
Author(s)	清水, 弘; SHIMIZU, Hiromu
Citation	低温科学. 物理篇, 26, 143-168
Issue Date	1969-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18084
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p143-168.pdf



斜面積雪の内部歪 I*

清水 弘

(低温科学研究所 雪害科学部門)

(昭和43年10月受理)

I. ま え が き

山地斜面につもった積雪内部に、どのような応力が生じ、その結果どのような変形が進行するかは、斜面積雪の振舞を考えるとときの基本的な問題であり、たとえば、なだれ発生機構を研究する場合には先ず調べなければならない問題であろう。これについては、既に Haefeli^{1)~3)}、桜井⁴⁾、大浦・小島⁵⁾、吉田^{6),7)}、藤岡ら⁸⁾の観測あるいは理論による研究がある。これらのうち、観測方法については夫々が問題点をのこしているので、昨冬新しい観測方法を考案し、それによって斜面積雪の内部歪をかなり直接的に、また継続的に観測した。

II. 観 測 場 所

観測は、北海道北部山地（北海道大学天塩地方演習林内中の峯、雪崩観測実験室の実験斜面）で行なわれた。実験斜面は、中の峯からはぼ真東に走る尾根の南北両斜面で、夫々かなり一様な傾斜面であり、斜面の長さは約250 m 余りであった。

同一地域内でも、北斜面と南斜面では雪質が著しく異なることは我々がよく経験することである。なだれ発生頻度を斜面の方位別にしらべると、南斜面（南東—南—南西）が最もなだれ易い⁹⁾。又、一様な積雪状態を仮定した場合でも、稜線直下と斜面中腹とでは積雪内部の応力状態、従って歪の進行の様子が異なるであろう。これらの問題を考慮して、南北両斜面の稜線直下地点、および斜面中腹地点に合計4つの観測点を設置した。斜面の植生状況は、両斜面とも深い熊笹に覆われているが、北斜面では中腹以下に白樺の疎林があった。各観測点はなるべく傾斜の一樣な場所にえらび、周囲約10 m 四方の熊笹を刈りはらい、簡単な整地を行なった。第1表に各観測点の位置を示す。

第1表 観測点の位置

観 測 点	斜面方位	稜線下距離	斜面傾斜角
A	南	30 m	25°
B		80 m	30°
C	北	20 m	30°
D		60 m	35°

* 北海道大学低温科学研究所業績 第940号

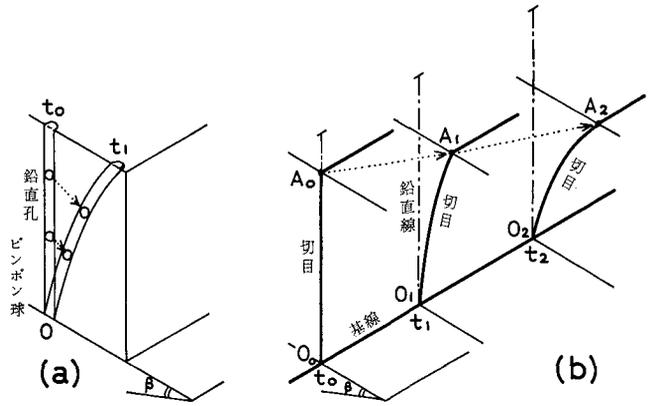
III. 観測方法

1. 斜面積雪内部歪の観測 この観測は、既に多くの研究者が種々の方法を試みている。

Haefeli (1939)³⁾, 桜井 (1941)⁴⁾ は、積雪に鉛直な孔をあけ、適当なつめ物を用いてピンポン球をその中に埋めこんでおき、後にこの孔を掘り出して孔の変形とピンポン球の埋没期間の変位ベクトルを測定した(第1図(a))。この方法によれば、積雪内部の変形の様子を直接眺めることができるが、つめ物等異物の介入により上下方向の変形が影響をうけるおそれがあり、また一回測定すれば周囲の積雪状態が乱されてしまい、その後の内部歪の進行をしらべることができない。

この点を改良して考案されたのが大浦一小島⁵⁾ (1959)の長鋸による、及び藤岡一清水⁶⁾ (1964)の電熱線による切目法である。大浦一小島は長さ約3mの帯鋸を使い、斜面積雪内に斜面等高線を含む鉛直な切目を作った。斜面の最大傾斜線を含む積雪の鉛直断面を観測面として作ると、この面上には、切目の面と、雪層境界面が線として現われる。この交点を測点にえらべば、一つの観測面について雪層と同数の測点が得られる。一定の期間において、新たな観測面を掘り進んで作ると、各観測面における各測点の位置から、その期間内の積雪内部の多くの点の変位が継続的に求められる(第1図(b))。この方法で大切なことは、最初の切目が等高線を含む鉛直な平面であることである。しかし、鋸操作に十分習熟しないと、長鋸は積雪内で曲ったり傾斜し易いという技術的な欠陥があった。この点を改良したのが、藤岡一清水の電熱線による切目法であった。藤岡一清水は小型ガソリン発電機又は交流電源を用いて、長鋸の代りに電熱線で雪をとかしながら積雪内に切目を作った。電熱線を用いると、殆んど完全に近い平面の切目が容易に作れた。切目の幅は1mm前後の極く薄いものであったが、融雪期のざらめ雪になった後も明瞭に観測することができた。電熱線法は最初の切目を鉛直平面に入れる点に工夫が加えられたが、観測原理は鋸法と同じである。

この切目法は Haefeli, 桜井らの方法にくらべると、積雪内に異物を介入しないこと、積雪内に多くの測定点をとり得ること、および継続観測を可能にした点ですぐれている。しかし、斜面積雪の切断により別の問題が生じた。斜面積雪内の応力に張力成分がある場合には(例えば凸斜面上の積雪内には、傾斜方向の張力が働いている)、積雪の塑性変形の進行につれてこの切口が広がって来た(第2図)。斜面積雪の圧縮領域及び平衡領域ではこの切目法は有効である



第1図 斜面積雪内部歪の観測方法

(a) Haefeli, 桜井の方法

(b) 大浦-小島, 藤岡-清水の方法

が、張力領域ではこの切目によって斜面上部と下部の積雪が切離されてしまうため、応力および歪の様子が自然状態とはかなり異なっていることが想像される。又、鋸法にせよ、電熱線法にせよその切断面に沿って薄い氷板ができ、切口附近の積雪の歪(特に沈降成分)が他の部分にくらべて多少異なった様相を示し(第2図)、その解析に別の問題を残した。

2. 穿孔法 上に述べた諸方法の問題点を考慮して、穿孔法が考案され昨冬使用された。本論文の観測・測定はこの穿孔法によるものである。

A. 原理 積雪の内部歪を正しく、又くわしくしらべるためには、

- (1) 積雪の自然状態をなるべく乱さないように、積雪内部に目印をつけ、
- (2) 各目印の変位を、適当な時間間隔をおいて継続的に観測する、

ことが必要である。Haefeli, 桜井の方法は(1)および特に(2)について、又、切目法は(1)について夫々問題を残した。

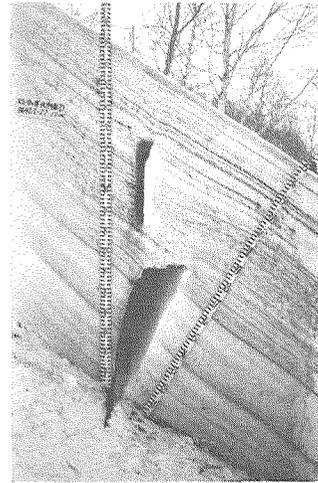
一様な斜面上に、一様な層構造をもった積雪が存在する場合、等高線に平行な細い孔を積雪内に作ってこれを目印とすれば、上記の2つの条件はほぼ満足されるであろう。つまり、

- (1) 直径1 cm程度の細孔の存在は、斜面積雪の全体的な内部歪には殆んど影響を与えない。
- (2) この細孔は同一雪層の同一の高さを水平に貫いているから、観測断面(最大傾斜線を含む鉛直面)を掘り進めることによって、壁の影響を避け自然状態に近い状態で、雪層内の特定な点の変位を継続的に追跡することができる。

B. 穿孔装置 以上の考え方に従って、一様な傾斜地をえらび、斜面等高線に平行な細孔を積雪内に作り、その変位を継続的に測定する装置を考えた。装置の要点は、斜面等高線に平行な細孔を作ることと、最大傾斜線を含む鉛直断面(観測面)を切り出すことである。

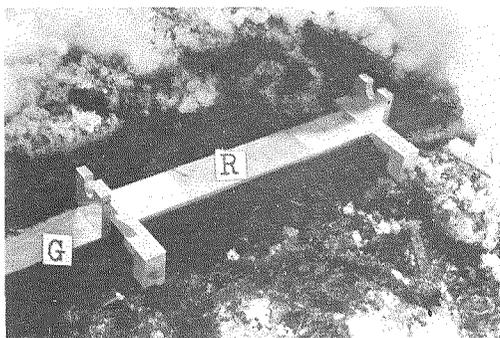
i) 基線(第3, 第5図のG): 秋のうちに観測点附近の下草を刈り払い、簡単な整地を行なってから、その中央部に長さ6 mの鉄製アングル材(5 cm×5 cm)を斜面等高線に沿って(水平に)地表面に固定し、測定の基線とした。アングルの固定には、水準器を用いながら、1 mおきに長さ60 cmの鉄釘をうった。

ii) 穿孔機(第3~6図): 穿孔機は穿孔棒 A, 同ホルダーブロック B₁, B₂, やぐら C, およびやぐら回転軸受 R から成り、他に円形配列8点穿孔機(第7図)が附属している。主な諸元は次の通りである。

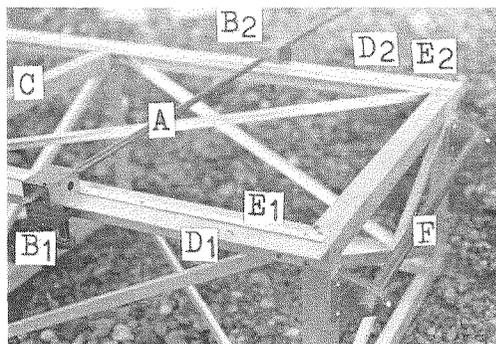


第2図 切目法を施した張力領域の斜面積雪

切口の開張、切口附近の層の歪、および切口を境界とした層のくいちがいなどが見られる。下段の切目は初回の観測時に施したものであり、上段の切目は2回目の観測時に、旧雪の上に積った新雪に施したものである。

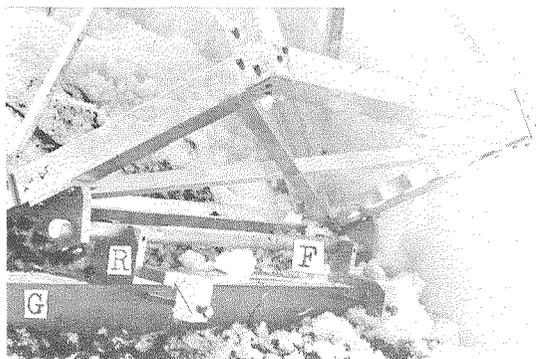


第3図 基線アングル G と軸受 R



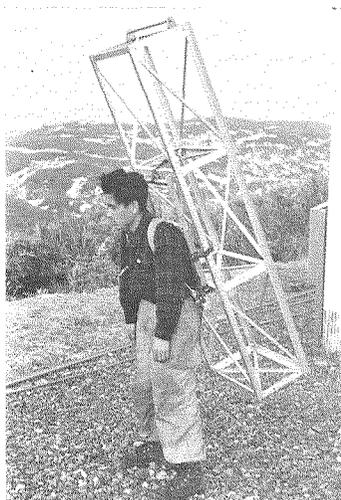
第4図 穿孔機

A 穿孔棒, B₁, B₂ 穿孔棒誘導のホルダーブロック, C やぐら本体, D₁, D₂ やぐら前面の柱, E₁, E₂ 物尺, やぐら回転軸

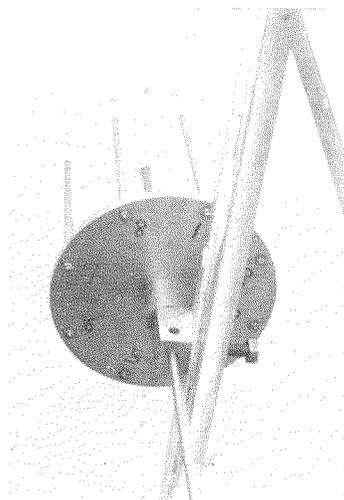


第5図 やぐら回転軸と軸受

G 基線アングル, F やぐら回転軸, R 同軸受



第6図 穿孔用やぐらの運搬



第7図 円形配列8点穿孔機

- ・穿孔棒 A (鋼製ドリルロッド): 直径 10 mm, 長さ 130 cm, 先端は頂角 90° の円錐形。
- ・やぐら C (ジュラルミンアングル材): 幅×奥行×高さ=50 cm×30 cm×180 cm。アングル材は 3 cm 角。

やぐら前面の柱 D_1, D_2 には 1 mm 目盛の物尺 E_1, E_2 がレベルを揃えて固定してある。真鍮製の穿孔棒ホルダーブロック B_1, B_2 は夫々この柱を物尺に沿って上下し、任意の目盛位置にネジで固定することができる。また、やぐら底面にはやぐら回転軸 F がやぐら前縁と平行にとりつけてあり、穿孔時には基線アングル G にネジ止めされた軸受 R に支えられる。

これらの機構により、やぐらは基線 G に垂直な平面 (最大傾斜線を含む鉛直面) 内を回転することができ、2 個のホルダーブロック B_1, B_2 の移動とそれに誘導される穿孔棒 A によって、基線附近の積雪内の任意の位置に基線に平行な細孔 (直径 10 mm) を作ることができる。(穿孔棒はホルダーブロック B_1, B_2 によって方向を定め、手で積雪内に押しこんだ。積雪内部の硬度、密度の不均一分布による棒の曲りを考慮して、1 回の穿孔深度は始め 60 cm 程度に止めたが、通常の積雪状態では 1.3 m 程度まで一挙に押しこんでも、穿孔棒は積雪内で曲らないことがわかった。また、やぐらの形は直方体よりも、底面附近で側面を三角形にしぼっておいた方が回転操作が容易であることが、使用後わかった。)

積雪内の局所的な歪を歪楕円 (後述) によって直接観察するために、円形配列 8 点穿孔機を使用した。これは第 7 図に示すように、真鍮円板周縁の同一円周上に 8 本の小穿孔棒を等間隔 (中心角 45°), 且つ円板に垂直に固定したものである。この円形配列の中心には、前記の穿孔棒 A が滑らかに通る円孔を、同じく円板に垂直にあけてある。穿孔棒 A でまず中心の孔を作り、次に A を雪につき刺した状態でガイドとし、円形配列穿孔器をはめて、積雪内に 8 個の円形配列孔を一挙にあけた。これらの孔もすべて基線に平行である。主な諸元は次の通りである。

- ・基板 (真鍮円板): 外周直径 22 cm, 小穿孔棒の中心を通る円の直径 19.5 cm, 厚さ 1 cm (中心孔附近の厚さは 5 cm)。
- ・小穿孔棒 (鋼製ドリルロッド): 直径 10 mm, 有効長 20 cm, 8 本。

以上が穿孔装置の概要である。各観測点への移動は、背負子を利用して容易に行なわれた (第 6 図)。

C. 穿孔と観測 各観測点の基線アングルの谷側の縁が測定基線にえらばれた。昭和 43 年 1 月 18, 19 の両日に各観測点に於ける最初の穿孔と断面観測が行なわれ、以後の観測と新しい穿孔は大体 2 週間目毎に行なわれ、春の融雪が活潑になって積雪内部歪が著しく一様を欠くまで継続された。観測回数は、積雪状態により各観測点に於て 5~7 回であった。

i) 最初の穿孔と観測: 各観測点に於て基線アングルの末端附近に雪穴を掘り、最大傾斜線を含む鉛直な積雪観測面を作った。この観測面について積雪断面観測 (雪温, 層構造, 雪質, 粒度, 密度, 硬度, 含水率) を行ない¹⁰⁾, その後穿孔を行なった。

穿孔は直線配列と円形配列の 2 種類の配列方法を考へて行なった。

(1) 直線配列孔 さげ振りを用いて、観測面上に基線を通る鉛直線を引き、この直線上に 10 cm おき、あるいは層構造を考慮した位置に穿孔した。これらの孔は、その最初の状態にお

いて一直線（鉛直線）上に並んでいるので、直線配列孔と呼ぶことにする。直線配列孔は、積雪層全体の歪の様子を観測するために作った。

(2) 円形配列孔 積雪全層は、幾つかの部分層に分けることができる。ひとつの部分層内の積雪の性質はかなり一様であり、変化する場合もその変化はゆるやかで、且連続的である。しかし異なった部分層内の積雪の性質は、それが隣接している場合でも不連続に変化することが多い。部分層の厚さが20 cm以上ある場合には、直線配列孔のひとつをこの部分層の中央附近に作り、これを中心とする円形配列8孔がこの部分層内におさまるように穿孔された。この場合、円形配列穿孔機の穿孔棒は20 cmであるから、更に穿孔棒Aによって孔を深くした。円形配列孔は、積雪部分層毎の局所的な内部歪をしらべるために作った。

穿孔後、前記の鉛直線に沿って物尺を観測面に固定し、曲尺を併用して各孔の中心位置を1 mmまで測定した（基線を原点とし、観測面上の鉛直線と水平線を両軸とする直角座標を使用）。これらの観測、測定が終了した後、雪穴を附近の雪で埋め、観測面の位置を示す標識柱を設置した。

ii) 2回目以降の観測と穿孔：観測用の雪穴は前回と同じ場所に掘られたが、観測面は前回よりも30~50 cm位基線に沿って掘り進んだ位置に作られた。これは前回の観測断面の影響を避けるためである。観察によると、色水を散布しトーチランプであぶられた観測面には氷膜が形成され、この壁附近の積雪の沈降は他の部分よりも小さかった。また、その氷膜を削りとおいた場合には、この観測面附近の沈降は他の部分よりも大きかった。そこで、新観測面を作るときは、壁面に露出した細孔が水平になるまで旧観測面から30~50 cm掘り進めることにした。

観測断面の仕上には、穿孔用のやぐらCが利用された。このやぐらは基線に垂直な平面に沿って回転するから、やぐらの縦柱Dの角で雪壁を削り所要の観測面（最大傾斜線を含む鉛直面）を容易に作る事ができた。

穿孔の直線性をよくするために、1回に行なう穿孔深度は60~130 cm程度であった。観測面の掘り進みによって浅くなった孔は、その都度穿孔機を用いて基線に平行に延長された。

また、新積雪があったときには、その部分について原点を通る鉛直線上に直線配列孔を新しく作り、その変位を観測した。

積雪の断面観測は、観測面について毎回行なわれた¹⁰⁾。

円形配列孔は、次の観測のときには楕円形配列に変形していた。つまり、積雪は内部に刻まれた円を楕円に変形させるような塑性変形を起していたわけである。このような変形は一般に均質歪とよばれている。均質歪の性質については、例えば Jaeger¹¹⁾ の教科書、藤岡¹²⁾ の論文にもものせられており、本論文ではその結果だけを利用することにした。但し、上記の文献を利用できない人のために、本論文の末尾に、均質歪の簡単な説明をのせておいた。

IV. 観測結果

1. 気象条件と積雪状態 観測期間中、気温・日射・風向・風速の4気象要素が稜線上で

自記記録された。積雪量は、観測点 A にスノーカメラ¹³⁾が設置され、毎日 2~3 回の記録が自動的に行なわれたが、他の観測点では毎観測時 (約 2 週間目毎) にだけ測定された。

i) 気温: 観測期間中の日平均気温を第 8 図に示す。

ii) 風と積雪: 観測地域に於ける冬期間の卓越風は SW 風であり、NE 風がこれ

に次いだ。降雪は殆んど SW 風に伴われ、附近の雪庇は SW 風の風下側に発達し、積雪深も北斜面の方が一般に深かった。

iii) 日射: 観測点附近の地形の南北鉛直断面を第 9 図に模型的に示す。太陽高度が δ_n であるとき、稜線 N, 南北両斜面の観測点 A および C に於ける入射角を夫々 i_n, i_a, i_c とすると、

$$\left. \begin{aligned} i_n &= 90^\circ - \delta_n \\ i_a &= i_n - \beta \\ i_c &= i_n + \beta' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

である。但し、 β, β' は各斜面の傾斜角である。太陽光線の強さを I_0 とし、N, A, C 各点の雪面に於ける単位面積当りの入射光線の強度を夫々 I_N, I_A, I_C とすると、

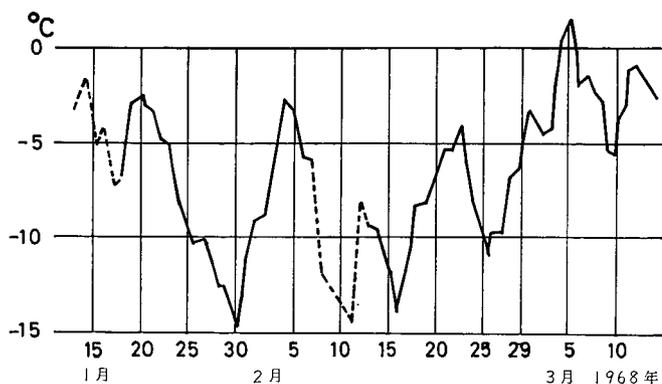
$$\left. \begin{aligned} I_N &= I_0 \cos i_n, \\ I_A &= I_0 \cos i_a = I_N \frac{\cos i_a}{\cos i_n}, \\ I_C &= I_0 \cos i_c = I_N \frac{\cos i_c}{\cos i_n}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。

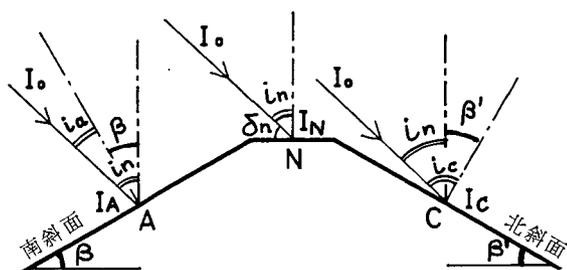
I_N は稜線上に水平に設置したゴルチンスキー輻射計を用いて連続的に記録した。太陽高度および太陽光線の雪面への入射角が、日出から日没まで時間の正弦函数で変化すると仮定し、

雪面に於ける光線反射率を 0.9 (新雪)~0.6 (ざらめ雪) として計算した各観測点の吸収日射エネルギーを、第 2 表に示した。

吸収された日射エネルギーは、雪温の上昇に消費されるが、その影響は越冬時には極めて弱く、また余り深部には達しない。しかし、雪温が 0°C に達した場



第 8 図 日平均気温



第 9 図 南斜面と北斜面の日射

第2表 各観測点に於ける吸収日射エネルギー

	太陽南中 平均高度	太陽平均高度	吸収日射エネルギー (cal/cm ²)			
			A	B	C	D
昭 43/1/18,19	25°50'	16°32'	361	343	0	0
1/30,31	29°15'	18°43'	1,218	1,218	0	0
2/13,14	33°50'	21°39'	2,204	2,204	1	0
2/27,28	39°05'	25°01'	2,692	2,692	6	1
3/12,13	44°40'	28°35'	—	1,988	—	13
3/26,27	50°50'	32°32'	—	—	—	84
4/13						

合には、吸収されたエネルギーは融雪を促進し、融雪水の滲透は積雪内部の温暖変態を急速に進行させ、積雪の機械的性質を著しく変化させる¹⁴⁾。この影響は、かなり速やかに、且つ非均一に積雪深部にまで到達するものと考えられる(融雪水の滲透と同程度)¹⁵⁾。

この表に掲げられた数値はゴルチンスキー輻射計による入射光の資料だけによる計算値であって、実際の熱収支を知るためには長波長輻射の出入を考慮しなければならない。しかし、南北両斜面の日射条件が著しく異なることはこの概算値からも明瞭である。気温・降雪量など他の気象条件は南北両斜面について格別顕著な差があるとは思われない。したがって、両斜面の積雪状態が厳冬期以後著しい差異を示す主な原因は日射条件であろうと想像される。

2. 斜面積雪内部歪の概観 南北両斜面の4観測点A, B, C, Dに於ける観測月日、観測間隔を第3表に、また各観測点に於ける直線配列孔、円形配列孔の変形過程を図版I~VIIに示す。

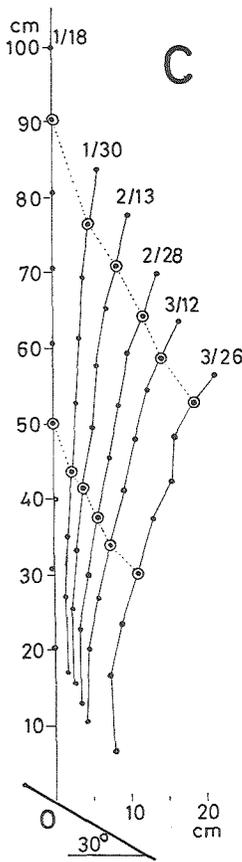
第3表 観測月日と観測間期間

観測点	期 間												
	1		2		3		4		5		6		
A	1/18	12日	1/30	14日	2/13	14日	2/27	15日	3/13				
B	1/19	11日	1/30	14日	2/13	15日	2/28	14日	3/13	14日	3/27		
C	1/18	12日	1/30	14日	2/13	15日	2/28	13日	3/12				
D	1/18	13日	1/30	14日	2/14	14日	2/28	13日	3/12	14日	3/26	18日	4/13

- 1/18は1月18日に観測を行なったことを示す。
- 期間は2つの観測の間隔を示す。

まず、この斜面積雪の歪の特徴をしらべてみよう。

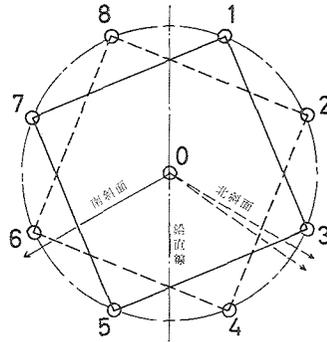
i) 積雪全層について：前に述べたように、各観測点に於ける直線配列孔は、はじめに基線にたてた鉛直線上に穿孔された。ところが、時間の経過につれて、この直線配列は例えば第10図に示すように変形して行った。このことから、積雪全層を一つの物体と考えた場合には、その内部歪は均質歪として取扱えないことがわかる。



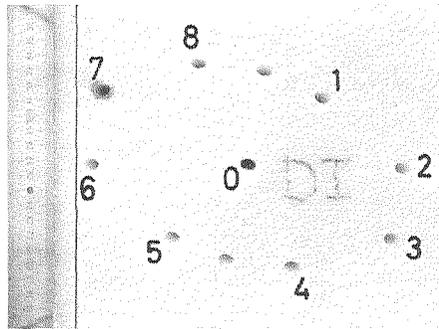
第10図 斜面積雪の内部歪

i) 積雪全層の内部変形 (観測点Cに於ける直線配列孔の変形。○円形配列穿孔の中心、●単一孔)

ii) 積雪部分層について：各円形配列孔は、できるだけ同一部分層内におさまるように作られた。円形配列8孔の各孔は第13図に示すように番号がつけられた。観測によると、これら8孔のうち、中心対称の位置にある2孔(第11図の1と5, 2と6, 3と7, 4と8)と中心孔0とは最初に同一直線上にあり、積雪の内部歪が進行しても、こ



第11図 円形配列8孔



第12図 斜面積雪の内部歪

ii) 部分層内の円形配列孔の変形(穿孔後53日目の円形配列DI: 3月12日。但し、1と8, 4と5の間にある無番号の孔は円形配列された孔ではない。)

の関係はかなりよく保たれていた(第12図)。したがって、これらの部分層内では、直線は直線として残るような変形が進行した。

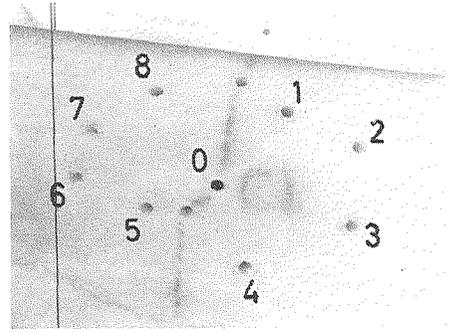
また、円形配列8孔のうち奇数番孔のみ(または偶数番孔のみ)を結んでできる正方形は、時間の経過につれて平行四辺形に極めて近い形で変形して行った(第12図)。つまり、これらの部分層内で起きた歪は、平行線はその平行性を保つような変形であった。

この2つの特徴は、とりも直さず均質歪の定義そのものである。従って、夫々の部分層内では均質歪が進行したと考えてよい。

積雪は実際には3次元の拡がりをもち、応力の分布については3次元の取扱いが必要である。しかし、斜面が一様で且十分広い場合には、その上につもった積雪内の点の変位は最大傾斜線を含む鉛直面内だけで起り、それに直角な方向、つまり等高線方向の変位は0であると考

えてよい。従って、このような斜面積雪の内部歪は2次元の問題として取扱うことができる。尚、前記の観察結果を併せて考えると、各積雪部分層の内部歪の解析には、巻末にまとめた2次元均質歪の理論をそのまま適用してよいであろう。各円形配列孔が、歪の進行につれて離心率のより大きな楕円に変形して行く様子が図版 I~VII に明瞭に認められる。

iii) 融雪期の積雪について：融雪が活潑な時期になると、積雪深の余り深くない場所（観測点 A, C など）では、積雪内部の歪の様子が急に変わり、積雪部分層内でも均質歪とは著しく異なった変形がおきた（第 13 図）。積雪は融雪水に浸されることによって急速な温暖変態をおこし、その機械的な性質を著しく変える¹⁴⁾。ところが、融雪水は水みちを作りながら局所的な径路によって積雪深部に滲透するため¹⁵⁾積雪内部の機械的な性質は不均一な分布を示し、その結果非均一な歪を起すことがあると考えられる。



第 13 図 斜面積雪の内部歪

iii) 融雪期に見られる変形（3月26日の円形配列 CI。但し、1の左上および5の無番号の孔は円形配列された孔ではない。）

3. 歪の主軸、主歪、最大剪断歪および歪速度

斜面積雪内の主歪に関しては、

- ϵ_1 : 斜面の最大傾斜線を含む鉛直面内で、水平方向附近に最大の伸びが観測された。
- ϵ_2 : 等高線に平行な方向（上記の鉛直面に直角な方向）の変位は 0 と考えてよい。
- ϵ_3 : 積雪内の鉛直軸方向附近に最大の縮みが観測された。

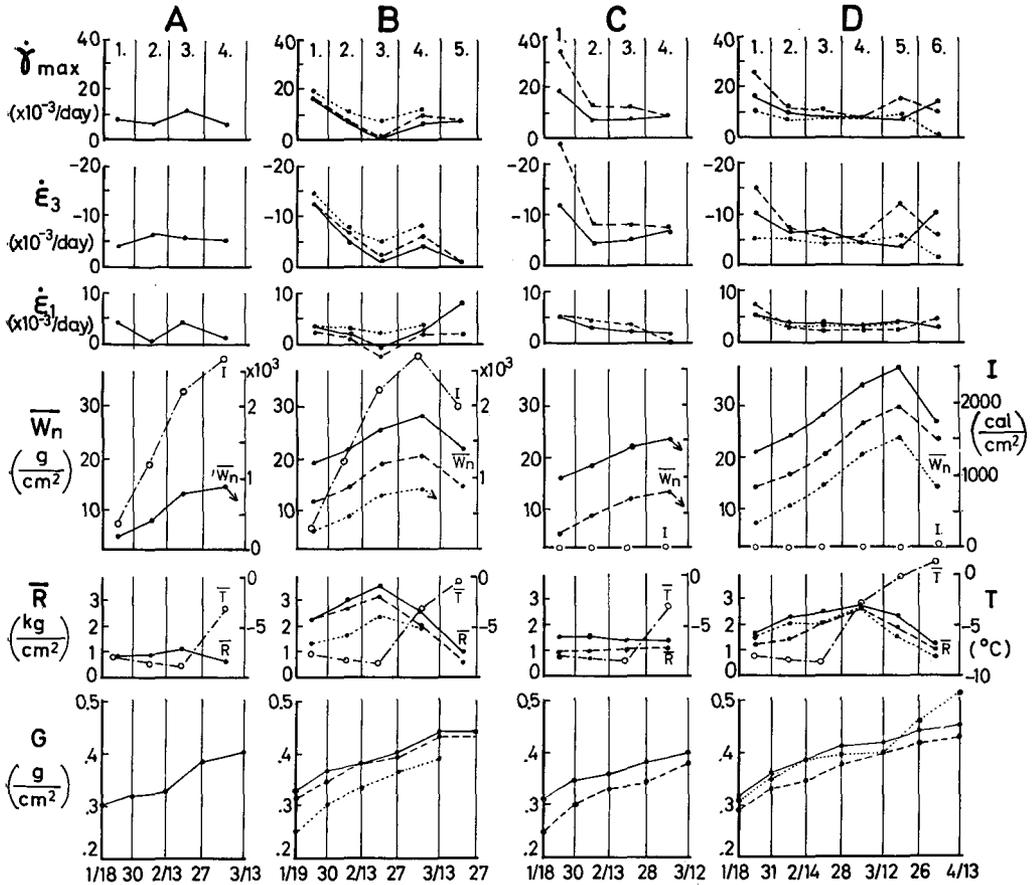
最大剪断歪 γ_{\max} は、巻末に述べるように歪主軸の 2 等分線の方向でおきている。

積雪の内部歪は時間の経過につれて進行するが、この間、気象条件の変化により荷重状態や積雪の性質も変化し、内部歪の進行もこれに影響されて変化する。気象要素は、気温・日射・風向・風速が連続的に記録されたが、積雪の歪量についてはほぼ 2 週間目毎の観測があるのみで、その中間の様子は不明である。そこで、ひとつの観測から次の観測までの期間は平均的な気象条件が継続し、積雪の内部歪もこの期間中一様に進行したと仮定しよう。最初の観測から第 2 回目の観測までを期間 1 とし、以下第 2 表に示すように各期間に 2, 3, 4 …… の番号をつけた。各期間の長さは一様ではないから、期間中の歪進行の様子を表わすには歪量それ自身よりも、1 日当りの歪速度 $\dot{\epsilon}$, $\dot{\gamma}$ を考える方が適当である。内部歪に関する観測結果を第 5 表に示す。

4. 積雪状態と歪速度 各観測点に於ける各期間の歪速度と積雪状態を第 14 図に示す。

まず、観測点 B に於ける積雪状態と歪速度の関係を考察してみよう。

期間 3 に於いて、期間平均気温は最低値を示し、積雪の圧縮硬度（木下式硬度計による）は最大値を示している。上層積雪による荷重はこの期間に更に増大しているにも拘らず、歪速度は減少して最小値を示している。



第14図 各観測点に於ける積雪状態と歪速度

横軸は時間（下端の数字は観測月日，1/18は1月18日を表わす。上端の数字は観測期間間，1.は期間1を表わす）。縦軸は $\dot{\gamma}_{max}$ 最大剪断歪速度， $\dot{\epsilon}_3$ 第3主歪（ちぢみ）速度， $\dot{\epsilon}_1$ 第1主歪（のび）速度，斜面に垂直方向の上層積雪荷重 \bar{W}_n ，圧縮硬度（木下式硬度計による） \bar{R} ，積雪密度 G 。——— 円形配列 I，----- 同 II，- - - - - 同 III。右側縦軸は気温 \bar{T} ，吸収日射量 I である。G は観測時の値，I は期間積算値であるが，他はすべて期間平均値である。

期間4には気温の上昇および吸収日射エネルギーの増加と相俟って雪温の上昇が想像され積雪硬度は減少している。一方，積雪荷重は愈増大して最大値に達し，積雪内の歪速度も増大して， $\dot{\gamma}_{max}$ および $\dot{\epsilon}_3$ （鉛直方向のちぢみ速度）はかなり明瞭な極大値を示している。期間4の前後に，この附近の南斜面でなだれが瀕発した形跡がある。

期間5に至って，南斜面の融雪は活潑になった。この時期には，積雪硬度は更に減少し，積雪荷重も減少しているが，歪速度の変化は一樣ではない。

5. 南斜面の積雪と北斜面の積雪 歪速度の変化の様子をみると，南斜面 A, B では全期間を通じて絶えず変化しているが，北斜面 C, D では期間2以降融雪期まで殆んど定常的である。南北両斜面の積雪の荷重条件は，かなり同一傾向の変化を示しているから，この歪速度

の様相は両斜面の特性を反映しているものと考えられる。

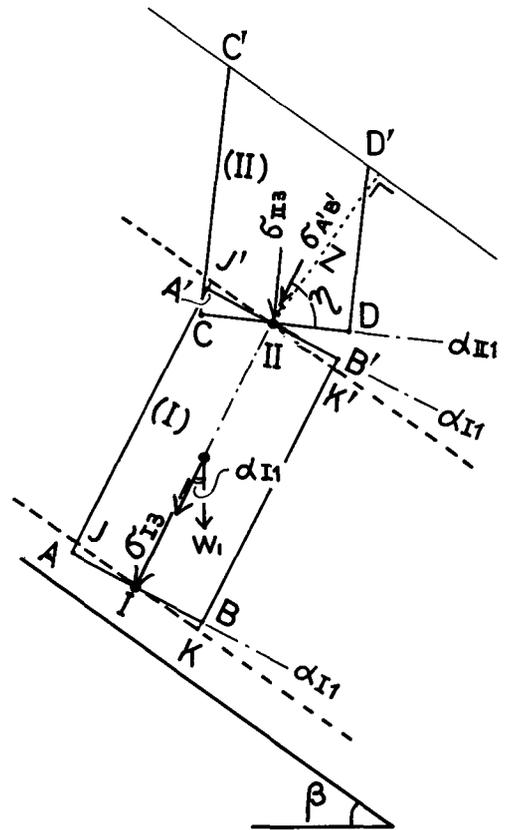
i) 両斜面の積雪の雪温と機械的性質：積雪の機械的性質は温度によって変化し、機械的強度は温度の上昇によって直線的に減少することが知られている^{16),17)}。また、雪温が高ければ積雪の変態の進行は早まり、特に融雪水にぬれると変態は著しく進行し、積雪の機械的性質を変化させる¹⁴⁾。雪温を変化させる要素は、気温については両斜面の間に顕著な差は考えられないから、輻射条件の差が原因と考えてよいであろう。輻射による積雪の熱収支を論ずる場合には、長波長輻射の出入の測定を欠いてはならないが、両斜面が吸収した日射エネルギーの量は極めて顕著な差を示している(第1表)。これが両斜面の雪温差をもたらした要因と考えてよいであろう。

ii) 両斜面の植生情況：はじめに述べたように、両斜面とも深い熊笹におおわれたかなり一樣な斜面であるが、北斜面は中腹以下に白樺の疎林がある。冬期間、両斜面の熊笹は積雪の下に寝てしまうが、白樺の立木はそのまま残るため斜面積雪の運動を妨げたことが考えられる。

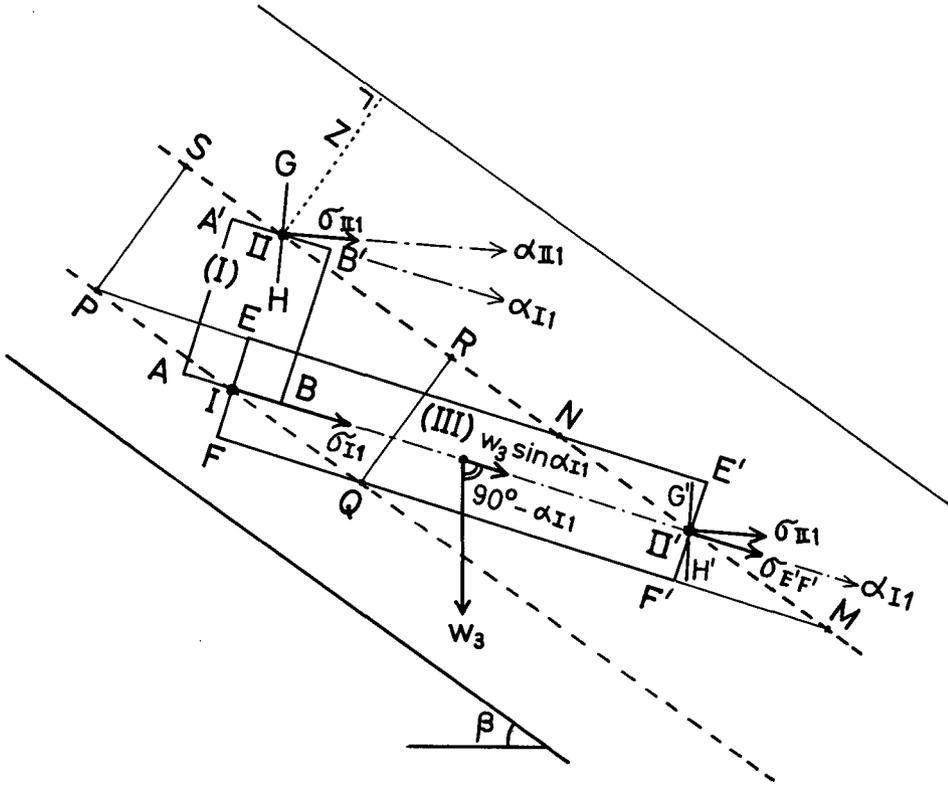
この両者のいずれが、C, Dに於ける斜面積雪の振舞に大きな影響を与えたかは速断することができない(これについては、次期の観測を計画中である)。しかし、C附近には立木が殆んどなく、一方D附近には数本の白樺の立木があるにも拘らず、両観測点での歪速度の変化は極めて類似な様相を示している。このことから考察すると、斜面積雪の振舞は雪温に影響される積雪の機械的強度に強く支配され、地形条件が類似の場合には、北斜面の積雪の方が南斜面よりも定常的であり、安定していると言えそうである。

6. 積雪内部の応力 今回の観測は積雪の内部歪について行なわれた。その結果、積雪部分層内では均質歪が進行していることが確められ、歪の主軸の方向および主歪の大きさが直接測定された。一般に等方性物体では、歪の主軸と応力的主軸とは一致する。積雪の場合、しもざらめ雪のように結晶成長の方向がもたらす機械的性質の異方性が顕著なものをのぞいては、部分層内の雪は等方性物質と考えてよい。このことを利用して、積雪内の応力について考察してみよう。

第15,16図に示すように積雪内部に2点I, IIをとり、各点に於ける歪の第1主軸が水平軸となす角を α_{I1} , α_{II1} とする。各点に於いて、歪



第15図 積雪内部の応力 (1)。第3主応力 σ_{I3} , σ_{II3} について。



第16図 積雪内部の応力(2)。第1主応力 σ_{II} , σ_{III} について。

の第3主軸に垂直な平面(単位面積) AB, CD をとり、各平面の上に垂直に載った積雪柱 (I) ($\square ABB'A'$), および (II) ($\square CDD'C'$) を考えよう。点 I, II に於いて紙面内に働く主応力を夫々 σ_{II} , σ_{I3} および σ_{III} , σ_{II3} とする。 σ_{II} , σ_{III} は横方向, σ_{I3} , σ_{II3} は上下方向に働く主応力である。

積雪柱 (II) の中では主応力の方向が一様で, σ_{III} , σ_{II3} の方向にひとしく, その側面には剪断応力が働かないと仮定すると, この部分の雪の釣合いの条件から,

$$\sigma_{II3} = z\rho_s \left\{ \cos \beta + \sin \beta \cot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

が求められる。ここで,

- β : 斜面の傾斜角,
- z : 斜面に垂直に測った雪面からの深さ,
- ρ_s : 積雪の密度,
- ψ : 匍匐角(匍匐ベクトルと積雪層のなす角),

である。同様な計算を, σ_{III} に垂直な面を底面にもつ横向の雪の柱について行なえば,

$$\sigma_{III} = z\rho_s \left\{ \cos \beta - \sin \beta \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right) \right\} \quad (4)$$

が得られる。尚, (16), (17) 式はすでに Haefeli²⁾ が求めたものである。

次に点 I に働く主応力 σ_{I3} の大きさについて考えてみよう。点 II を通り, AB に平行な面 A'B' を考えると, 面 A'B' の方向が点 II に於ける第 1 主軸となす角は

$$\eta = 90^\circ - (\alpha_{III} - \alpha_{II})$$

であるから, 面 A'B' に働く垂直応力は,

$$\begin{aligned} \sigma_{A'B'} &= \frac{1}{2}(\sigma_{III} + \sigma_{II3}) + \frac{1}{2}(\sigma_{III} - \sigma_{II3}) \cos 2\eta \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_{III} + \sigma_{II3}) - \frac{1}{2}(\sigma_{III} - \sigma_{II3}) \cos 2(\alpha_{III} - \alpha_{II}) \end{aligned} \quad (5)$$

である。また積雪柱 (I) の重量を w_1 とすると,

$$w_1 \cos \alpha_{II} \quad (6)$$

は, 面 AB に垂直に作用する積雪柱 (I) の重力成分である。したがって面 AB に働く主応力のひとつ (第 3 主応力) は,

$$\sigma_{I3} = \sigma_{A'B'} + w_1 \cos \alpha_{II} \quad (7)$$

で与えられる (第 15 図)。この場合も, 積雪柱 (I) の内部では主軸の方向は一樣で σ_{II} , σ_{I3} の方向にひとしく, 積雪柱の側面には剪断応力が働かないという仮定に基づいている。

次に σ_{II} を考えるために第 16 図の (III) のような横の積雪柱 ($\square E'F'E'$) の釣合を考察しよう。この柱の断面 EF は単位面積であり, 柱の軸の方向は第 1 主応力軸の方向 α_{II} と一致している。図中の破線は積雪層の走行を示し, この横柱右端の点 II' は積雪柱 (I) の上端の点 II と同等である。したがって, 点 II' に働く主応力は (16), (17) の両式で与えられる σ_{III} , σ_{II3} である。ところが, 面 E'F' の方向は σ_{III} と $(\alpha_{III} - \alpha_{II})$ なる角をなしているから, 面 E'F' にはたらく垂直応力 $\sigma_{E'F'}$ は,

$$\sigma_{E'F'} = \frac{1}{2}(\sigma_{III} + \sigma_{II3}) + \frac{1}{2}(\sigma_{III} - \sigma_{II3}) \cos 2(\alpha_{III} - \alpha_{II}) \quad (8)$$

である。また, 積雪柱 (III) の重量を w_3 とすると,

$$w_3 \cos (90^\circ - \alpha_{II}) = w_3 \sin \alpha_{II} \quad (9)$$

は, 面 EF に垂直に作用する積雪柱 (III) の重力成分である。したがって, 面 EF を通して点 I に作用する主応力のひとつ (第 1 主応力) は,

$$\sigma_{II} = \sigma_{E'F'} + w_3 \sin \alpha_{II} \quad (10)$$

で与えられる (第 18 図)。

尚, w_3 の計算は次のようにすればよい。

$$\square E'F'E' = \square PQMN = \square PQRS$$

である。ここで,

$$PQ = \frac{EF}{\cos \widehat{P\hat{E}E}} = \frac{1}{\cos [90^\circ - (\beta - \alpha_{11})]} = \frac{1}{\sin (\beta - \alpha_{11})} \quad (11)$$

であるから、

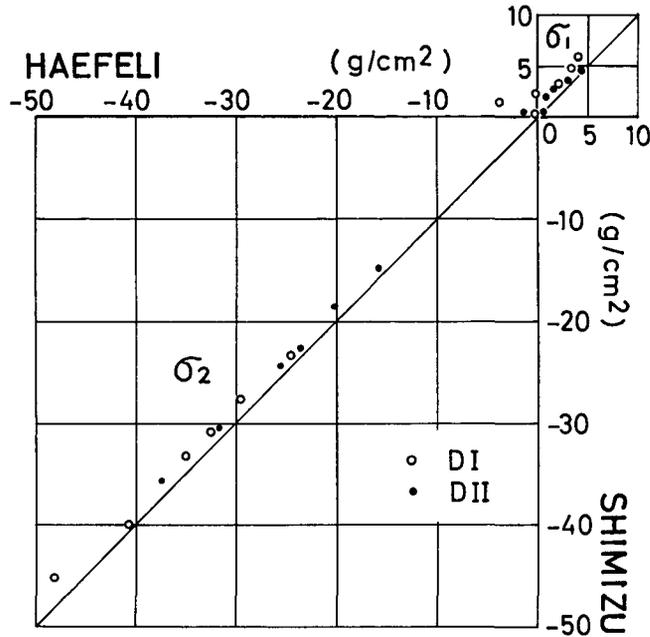
$$\omega_3 = \frac{1}{\sin (\beta - \alpha_{11})} \omega_1 \quad (12)$$

である。

この取扱い方を観測点 D に於ける積雪に適用し、計算で求めた積雪内の主応力を第 4 表に示す。円形配列 D III に於ける主応力は Haefeli の式 (16), (17) を直接使って計算したが、D II, D I の主応力は第 15, 16 図のような考察に基づいて計算した。Haefeli の方法をそのまま D II, D I に適用した結果は、同じく第 4 表に載せてあるが、第 17 図に両方法による結果を比較した。我々の方法によると、第 1 主応力 (σ_1 : 積雪の斜面方向に伸びまたはちぢみを起させる応力) は Haefeli の計算値よりもすこし大きめな値が、また第 3 主応力 (σ_3 : 積雪の上下方向のちぢみを起させる応力) は、Haefeli よりもすこし小さめな値が得られた。

第 4 表 積雪内部の主応力、主歪速度および引張粘性率と圧縮粘性率
(昭和 43 年 1 月~4 月, 間寒別雪崩実験研究室附近)

位置 期間	主 応 力 (g/cm)		主 歪 速 度 (/day)		粘 性 係 数 (gday/cm ²)			
	Haefeli σ_1 σ_3	Shimizu σ_1 σ_3	$\dot{\epsilon}_1$	$\dot{\epsilon}_3$	引張 η'_e	圧縮 η'_c	η'_c/η'_e	
D III	1	2.0 - 8.3	(Haefeli の 方法による)	5.4×10^{-3}	-5.4×10^{-3}	3.7×10^2	15.4×10^2	4.2
	2	1.5 - 12.5		2.2	-5.0	6.8	25.0	3.7
	3	3.1 - 16.5		2.9	-4.3	10.7	38.4	3.6
	4	2.3 - 23.9		3.1	-4.6	7.4	52.0	7.0
	5	0.2 - 29.6		3.6	-6.4	0.6	46.2	77
	6	0.1 - 17.2		1.7	-1.7	0.6	101	168
D II	1	3.0 - 15.8	3.9 - 14.9	7.7×10^{-3}	-15.4×10^{-3}	4.4×10^2	9.7×10^2	2.2
	2	0.8 - 20.1	1.9 - 18.5	2.9	- 7.1	6.6	26.0	3.9
	3	4.2 - 23.7	4.3 - 22.8	2.2	- 5.0	19.6	45.6	2.3
	4	1.5 - 31.7	2.6 - 30.6	2.3	- 5.4	11.3	56.7	5.0
	5	-1.5 - 37.5	0.5 - 35.7	2.2	-12.1	2.3	29.5	12.8
	6	0.5 - 25.4	0.3 - 24.3	3.3	- 6.1	0.9	39.9	44.3
D I	1	3.5 - 24.8	4.9 - 23.5	5.4×10^{-3}	-10.0×10^{-3}	9.1×10^2	23.5×10^2	2.6
	2	-0.1 - 29.5	2.1 - 27.9	3.6	- 6.4	5.8	43.6	7.5
	3	4.0 - 32.9	6.0 - 30.8	3.6	- 6.4	16.6	48.1	2.9
	4	2.0 - 40.9	3.1 - 40.0	3.1	- 4.6	10.0	87.0	8.7
	5	-3.9 - 48.2	1.5 - 45.2	3.6	- 3.6	4.2	126	30.0
	6	-0.2 - 35.3	0.3 - 33.3	1.7	-10.6	1.8	31.4	17.5



第17図 観測点Dに於ける積雪内部の応力
(Haefeliの方法および清水の方法による計算結果の比較)

7. 積雪の引張粘性率(η_e)と圧縮粘性率(η_c) 積雪内の応力および歪速度状態が,

第1主軸 $\sigma_1 > 0, \dot{\epsilon}_1 > 0$ (引張り)

第3主軸 $\sigma_3 < 0, \dot{\epsilon}_3 < 0$ (圧縮)

であるとき、周囲を束縛された状態での積雪の引張粘性率(η_e)および圧縮粘性率(η_c)を、それぞれ次のように定義しよう。

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{\eta_e} \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \frac{\sigma_3}{\eta_c} \quad (14)$$

この定義に従って計算した、各円形配列孔附近の期間平均粘性率を第5表に示す。これによると、積雪が乾いているときには η_e は η_c の2~9倍程度であるが、融雪期になると10倍以上数10倍にも達する結果になる。

VI. ま と め

斜面積雪の内部歪を観測するため、穿孔法を考案した。孔は直径1cmで、斜面等高線に平行にあげられた。斜面の最大傾斜線を含む鉛直面を作って観測面とすれば、この細孔は観測面上には点となって現われる。この点の位置を約2週間目毎に測定し、積雪内の点の変位ベクトルをしらべた。尚、旧観測面の影響を防ぐために、毎観測ごとに30~50cm掘り進んだ位置

に新しい観測面を作り、浅くなった細孔は、穿孔機によって等高線に平行に延長された。

斜面の方位、稜線からの距離が斜面積雪の振舞に及ぼす影響をしらべるために、4つの観測点 A, B, C, D が南北両斜面の稜線直下および斜面中腹に夫々設置された。

斜面積雪の内部歪は、

- i) 積雪全層については非均質歪であり
- ii) 積雪部分層内では均質歪が進行し
- iii) 融雪期には、積雪部分層内でも非均質歪が起る

ことがわかった。

斜面積雪の張力領域では、

- i) 観測面内の水平軸方向附近に最大の伸び (ϵ_1) が観測され
- ii) 斜面等高線に平行な方向の変位は 0 (ϵ_2) と考えてよく
- iii) 鉛直軸方向附近に最大の縮み (ϵ_3) が観測された

積雪状態と歪速度の関係は第 16 図に示してあるが、積雪の歪速度はその機械的強度に強く支配されるようである。積雪の機械的性質は変態状況および雪温によって変化するが、この際日射エネルギーが大きな役割を果たしていると考えられる。雪面に於ける日射エネルギーの吸収量は、南斜面では北斜面の数倍以上に達し、歪速度も全期間を通じて変化している。期間 4 に於いて南斜面の積雪内部では歪速度が極大値を示し、この時期に、この地域の南斜面では全層なだれが瀕発した様子である。これにくらべて、北斜面の積雪は歪速度も殆んど定常状態を保ち、積雪状態も安定であった。

しもざらめ雪などの特殊な場合を除き、積雪は等方性物質であると考えられるから、歪の主軸と応力の主軸が一致するという仮定に基づき、積雪内の平衡条件から応力を計算した。これによると、第 1 主応力 (σ_1 : 積雪の斜面方向の伸びを起させる応力) は Haefeli の方法による計算値よりも少し大きめに、また第 3 主応力 (σ_3 : 積雪の上下方向のちぢみを起させる応力) は Haefeli よりも少し小さめな値が得られた。

最後に、この応力と歪速度から、自然積雪に周囲を束縛された雪の引張および圧縮粘性率を計算した。結果は、圧縮粘性率は引張粘性よりも乾雪については数倍、ぬれ雪については数十倍に達する大きな値を示した。

この研究に関して藤岡敏夫教授の御指導、秋田谷英次、成田英器両助手を始め低温科学研究所の若手研究員の積極的な御協力をいただいた。穿孔機の作製に関しては、研究所附属工場の小笠原英治、大方由松、中山政太郎技官の格別の御尽力を頂いた。また、観測作業の運営に関しては天塩地方演習林の滝川貞男林長、小林信運転手をはじめ職員各位の御援助を頂いた。ここに記して感謝の意を表わす。この研究の費用の一部は文部省特別事業費から支出された。

文 献

- 1) Haefeli, R. 1939 Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. *Beitr. Geologie der Schweiz, Geotech. Ser. Hydrol.*, **3**, 63.
- 2) Haefeli, R. 1963 Stress transformations, tensile strengths, and rupture processes of the snow cover. *In Ice and Snow* (W. D. Kingery, *ed.*), M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 560-575.
- 3) Haefeli, R. 1967 Some mechanical aspects on the formation of avalanches. *In Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, *ed.*), Inst. Low Temp. Sci. Sapporo, 1199-1213.
- 4) 桜井俊輔 1941 傾斜面に積った積雪層の移動測定 (特に筋匐と沈降). 雪氷, **3**, 429.
- 5) 小島賢治 1960 斜面積雪の粘性流動 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 147-164.
- 6) 吉田順五 1963 一様な斜面上の積雪の内部応力. 低温科学, 物理篇, **21**, 1-12.
- 7) 吉田順五 1964 斜面積雪の内部応力および粘性流動 I, II, III. 低温科学, 物理篇, **22**, 84-100, 101-117, 119-127.
- 8) Huzioka, T. and others 1967 Observation of creep rate of snow on mountain slopes, Teshio District, Hokkaido. *In Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, *ed.*), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 1177-1183.
- 9) Schaerer, P. A. 1967 The amount of snow deposited at avalanche sites. *In Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, *ed.*), Inst. Low Temp. Sci. Sapporo, 1255-1260.
- 10) 藤岡敏夫・清水弘・秋田谷英次・成田英器 1968 雪崩観測実験室実験斜面の雪質調査報告 II. (昭和 40~41 年, 41~42 年, 42~43 年冬). 低温科学, 物理篇, **26**, 187-214.
- 11) Jaeger, J. C. 1956 *Elasticity, Fracture and Flow*. Methuen, London.
- 12) 藤岡敏夫 1959 スキーの研究 (4). 低温科学, 物理篇, **18**, 59-76.
- 13) 藤岡敏夫・清水弘・秋田谷英次・成田英器 1968 雪崩観測実験室実験斜面積雪の特質. 低温科学, 物理篇, **26**, 169-185.
- 14) 若浜五郎 1965 水を含んだ積雪の変態. 低温科学, 物理篇, **23**, 51-66.
- 15) 若浜五郎 1963 積雪内における融雪水の移動 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 45-74.
- 16) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学, 物理篇, **19**, 135-146.
- 17) Kinoshita, S. 1967 Compression of snow at constant speed. *In Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, *ed.*), Inst. Low Temp. Sci. Sapporo, 911-927.

第5表 斜面積雪の内部歪 (昭和43年1月~4月, 間寒別雪崩実験研究室附近)

円形配列中心孔の位置 X軸: 基線を通る観測面内の水平軸 (谷側が正), Y軸: 基線を通る鉛直線 (上が正), Bの第4観測以降は中心孔消失のため推定位置を掲げた。α: 歪の主軸はX軸 (水平軸) から測り, 谷に向かって上向きを正, 下向きを負にとった。rot: 回転角の測り方も同じ。G, R: 密度 (乾燥密度), 硬度は円形配列孔のおさまっている層内の平均値。体積変化, h^2 : 歪槽円から計算した体積変化率 ($h^2=ad-bc$), ΔG : 円形配列孔のおさまっている層の平均密度変化から算出した体積変化率 ($\Delta G=\bar{G}_i/\bar{G}_{i+1}$, 但し \bar{G}_i は i 回目の観測時の平均密度)

観測点	円形配列	観測月日	円形配列孔 中心位置 X (cm)	円形配列孔 中心位置 Y (cm)	密度 G (g/cm ³)	硬度 R (kg/cm ²)	期間	歪主軸 α	主 歪 ε ₁	歪 ε ₃	最大 剪断歪 γ _{max}	回転 rot	体積変化 h ² ΔG
A	A-I	1 1/18	0	30.5	0.03	1.2	1	0°	+0.05	-0.05	0.01	0°	0.93 0.93
		2 1/30	1.5	25.8	0.32	0.5	2	+10.3°	+0.01	-0.09	0.01	-0.6°	0.92 0.99
		3 2/13	2.0	23.1	0.33	1.2	3	+24.6°	+0.06	-0.08	0.14	-0.7°	0.86 0.84
		4 2/27	3.1	20.4	0.39	0.9	4	+7.6°	+0.02	-0.08	0.10	-0.9°	0.94 0.96
		5 3/13	5.8	15.2	0.40	0.5							
B	B-III	1 1/19	-0.1	78.9	0.26	0.8	1	-4.1°	+0.04	-0.16	0.21	-5.0°	0.88 0.88
		2 1/30	4.5	66.6	0.30	1.8	2	+9.2°	+0.04	-0.10	0.15	-1.2°	0.94 0.89
		3 2/13	8.0	61.8	0.34	1.5	3	-1.7°	+0.03	-0.07	0.10	-3.8°	0.96 0.93
		4 2/27	(9.7)	(53.0)	0.37	3.3	4	+8.8°	+0.05	-0.12	0.18	-3.6°	0.93 0.87
		5 3/13	(15.1)	(44.1)	0.39	0.4							
	B-II	1 1/19	0.1	55.8	0.32	1.9	1	-5.9°	+0.03	-0.14	0.18	-4.6°	0.89 0.92
		2 1/30	3.5	47.1	0.35	2.6	2	+1.2°	+0.01	-0.09	0.10	-2.4°	0.92 0.92
		3 2/13	6.1	43.6	0.38	2.8	3	-18.9°	-0.03	-0.03	0	-2.0°	0.94 0.97
		4 2/27	(7.5)	(36.9)	0.39	3.4	4	+3.8°	+0.05	-0.09	0.14	-3.3°	0.96 0.91
		5 3/31	(11.1)	(29.8)	0.43	0.5	5	+1.2°	+0.03	-0.07	0.10	-2.4°	0.96 0.90
		6 3/27	(13.6)	(23.9)	0.43	0.5							
	B-I	1 1/19	0.2	30.3	0.33	1.6	1	-5.2°	+0.04	-0.13	0.18	-3.6°	0.90 0.90
		2 1/30	2.3	25.2	0.37	3.2	2	+5.5°	+0.03	-0.07	0.10	-3.8°	0.96 0.97
		3 2/13	3.8	23.4	0.38	3.1	3	+7.8°	-0.01	-0.01	0	-1.5°	0.98 0.94
		4 2/27	(4.9)	(17.7)	0.40	4.1	4	-4.5°	+0.04	-0.06	0.10	-3.5°	0.98 0.92
		5 3/13	(7.5)	(12.3)	0.44	0.9	5	+5.1°	+0.11	-0.01	0.10	0°	1.00 1.00
		6 3/27	(9.3)	(7.5)	0.44	1.2							
	C	C-II	1 1/18	0	90.2	0.25	0.9	1	-1.1°	+0.06	-0.29	0.41	-8.4°
2 1/30			4.9	76.4	0.30	0.8	2	-4.8°	+0.06	-0.11	0.18	-5.6°	0.95 0.91
3 2/13			8.3	70.9	0.33	0.9	3	-5.9°	+0.05	-0.12	0.18	-4.2°	0.93 0.95
4 2/28			11.8	64.2	0.35	0.9	4	-6.1°	0	-0.10	0.11	-2.8°	0.90 0.92
5 3/12			14.3	58.5	0.38	1.1							
C-I		1 1/18	0	50.1	0.31	1.2	1	-0.7°	+0.06	-0.14	0.21	-3.6°	0.91 0.89
		2 1/30	2.2	43.8	0.35	1.9	2	-5.4°	+0.04	-0.06	0.01	-2.9°	0.98 0.96
		3 2/13	3.9	41.3	0.36	1.3	3	-1.3°	+0.03	-0.07	0.01	-4.1°	0.96 0.96
		4 2/28	5.6	37.5	0.38	1.4	4	-1.0°	+0.02	-0.08	0.01	-1.8°	0.94 0.95
		5 3/12	7.2	33.9	0.40	1.2							

観測点	円形配列	観測月日	円形配列孔中心位置 X (cm)	円形配列孔中心位置 Y (cm)	密度 G (g/cm ³)	硬度 R (kg/cm ²)	期間	歪主軸 α	主歪 ϵ_1	歪 ϵ_3	最大剪断歪 γ_{max}	回転 rot	体積変化 $h^2 D_G$
D	D-III	1 1/18	0	121.0	0.31	1.7	1	- 2.9°	+0.07	-0.07	0.14	-2.3°	0.90 0.89
		2 1/31	6.8	102.7	0.35	2.0	2	-12.6°	+0.03	-0.07	0.10	-2.0°	0.96 0.92
		3 2/14	11.6	93.2	0.38	2.1	3	- 8.4°	+0.04	-0.06	0.10	-2.8°	0.98 0.97
		4 2/28	15.6	83.2	0.39	1.9	4	- 4.3°	+0.04	-0.06	0.10	-1.7°	0.98 0.96
		5 3/12	19.2	76.4	0.40	2.7	5	- 4.1°	+0.05	-0.09	0.14	-3.2°	0.96 0.94
		6 3/26	25.0	68.3	0.46	0.3	6	- 8.9°	-0.03	-0.03	0	-0.6°	0.94 0.94
		7 4/13	32.0	57.6	0.51								
	D-II	1 1/18	0	90.7	0.29	1.0	1	-10.0°	+0.10	-0.20	0.32	+5.1°	0.88 0.88
		2 1/31	5.4	77.8	0.33	1.3	2	+ 2.1°	+0.04	-0.10	0.15	0°	0.94 0.95
		3 2/14	9.1	71.5	0.35	1.6	3	- 5.7°	+0.03	-0.07	0.10	-2.6°	0.96 0.92
		4 2/28	12.4	63.9	0.38	2.4	4	- 7.0°	+0.03	-0.07	0.10	-2.7°	0.96 0.93
		5 3/12	15.5	58.5	0.40	2.6	5	- 0.1°	+0.03	-0.17	0.22	-2.8°	0.86 0.96
		6 3/26	20.4	52.5	0.42	1.1	6	- 5.4°	+0.06	-0.11	0.18	-1.8°	0.95 0.88
		7 4/13	26.9	42.8	0.43	0.9							
	D-I	1 1/18	0	61.1	0.32	1.0	1	- 6.0°	+0.07	-0.13	0.21	-4.7°	0.93 0.88
		2 1/31	3.9	53.0	0.36	2.2	2	- 6.5°	+0.05	-0.09	0.14	-2.9°	0.96 0.96
		3 2/14	6.4	49.3	0.38	2.2	3	-16.0°	+0.05	-0.09	0.14	-1.7°	0.96 0.93
		4 2/28	9.1	43.6	0.41	2.6	4	- 6.5°	+0.04	-0.06	0.10	-2.9°	0.98 0.99
		5 3/12	11.5	39.9	0.42	2.9	5	- 7.4°	+0.05	-0.05	0.10	-1.2°	1.00 0.96
		6 3/26	15.4	35.2	0.44	1.7	6	- 6.4°	+0.03	-0.19	0.24	-2.5°	0.84 0.87
		7 4/13	21.2	27.2	0.45	6.8							

附 録

2次元の均質歪

1. 均質歪^{(11),(12)} 今、物体内部に直線の目印をつけたと仮想してみよう。この直線は、物体の実質部分に直接書きこまれたもので、実質部分の移動の目印になるものである。この物体が変形を起したとき、

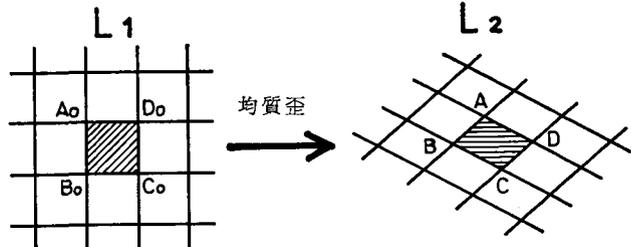
(1) 直線は、変形後も直線でのこり

(2) 平行線は、変形後も互いに平行線として残る

ような場合には、この変形は“均質歪 (homogeneous strain)”と呼ばれる。ただし、直線の方向および平行線の間隔は、変形によって一般に変化する。均質歪を2次元の場合について考えると、第18図に模式化したように、直交格子 L_1 を斜交格子 L_2 に変形させるような歪である。この変形によって、正方形 $A_0B_0C_0D_0$ は平行四辺形 $ABCD$ にかわる。したがって、均質歪とは正方形を平行四辺形に変形させるような歪と考えてよい。均質歪は、一般有限歪のうちのひ

とつの特殊な場合であって、その取扱いが比較的容易である。

均質歪を数学的に取扱うと次のようになる。物体内の任意の一点 $P_0(x, y)$ が、物体の変形によって $P(x', y')$ に移動し、 (x, y) と (x', y') の間に直線変換関係が成



第18図 均質歪

立つ場合に、この変形は均質歪であるという。つまり、均質歪の条件は、

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax + by \\ y' &= cx + dy \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

である。ここで、常数 a, b, c, d によってその均質歪のすべてが定まる。しかし、この式のままだでは、均質歪がどんな特徴をもっているかを感覚的にとらえにくい。次に述べる歪楕円をつかうと、その点が細部までわかりやすくなる。

2. 歪楕円 均質歪をうけると、正方形は平行四辺形にかわりと同時に、一般にその位置も移動する。しかし、位置の移動は物質の物理変化としての歪それ自身には関係をもたない。従って、正方形の中心が移動せずに平行四辺形に変形したと考えても、議論の一般性は失われない。そこで、この見地から2次元の均質歪を考えてみよう。

今、一辺の長さ2なる $\square P_0Q_0R_0S_0$ が、均質歪によって中心が移動しないまま $\square PQRS$ に変形したとする。第19図に示すように、正方形の中心 O を原点とし、正方形の隣接2辺に平行に x 軸、 y 軸をとると、 $\square P_0Q_0R_0S_0$ に内接する円(半径1の単位円)、

$$x^2 + y^2 = 1 \quad (16)$$

は、(1)式で与えられる均質歪の変換を用いると、 $\square PQRS$ に内接する楕円、

$$\frac{c^2 + d^2}{h^4} x'^2 - \frac{2(ac + bd)}{h^4} x'y' + \frac{a^2 + b^2}{h^4} y'^2 = 1 \quad (17)$$

ここで、

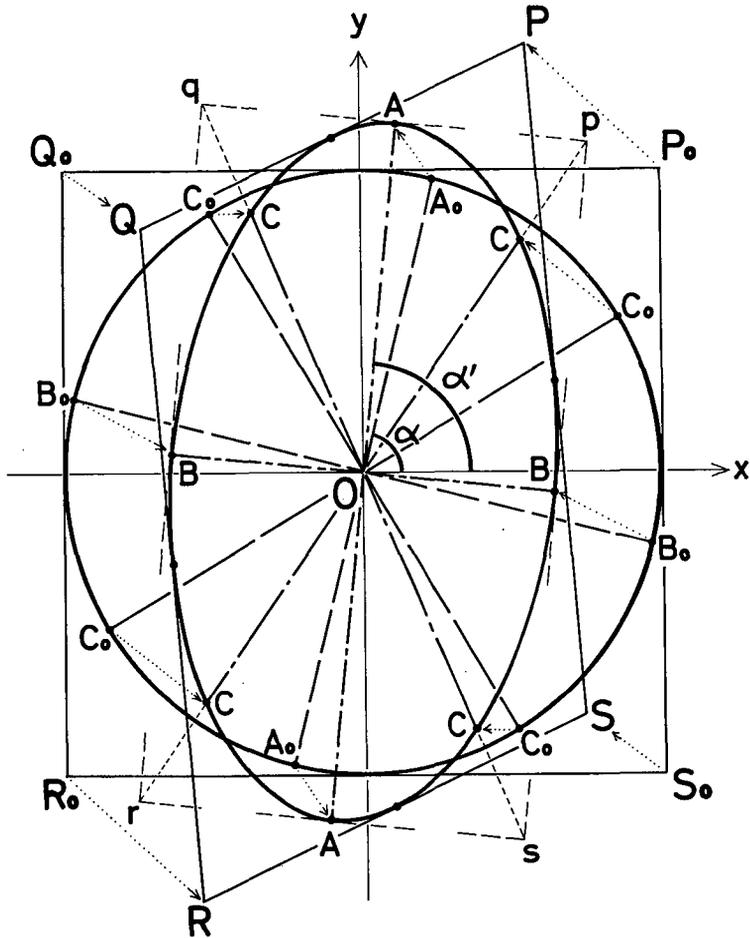
$$h^2 = ad - bc \quad (18)$$

に変形することがわかる。この楕円を“歪楕円 (strain ellipse)”と呼ぶ。

3. 歪の主軸と主歪 歪楕円の長軸、短軸の長さを夫々 $2A, 2B$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} (A+B)^2 &= (a+d)^2 + (b-c)^2 \\ (A-B)^2 &= (a-d)^2 + (b+c)^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

の関係がある。楕円の半径のうち、最大のものが半長軸 OA (長さ A)、最小のものが半短軸 OB (長さ B) であるが、変形前にはこれらはいずれも単位円の半径 OA_0, OB_0 (長さ1) であった。したがって、歪楕円の長短両半径は、この均質歪によって最大又は最小の歪をうけた結果の方向と長さを示している(註 最大、最小の歪: 本論文ではのびによる変形量をプラス、ちぢ



第19図 歪 楕 円

A_0A_0 歪の第1主軸, B_0B_0 第2主軸, RLC_0OC_0 最大剪断歪のおきる方向;
 AA 第1主軸の変形後の位置 (歪楕円長軸), BB 第2主軸の変形後の位置
 (歪楕円短軸), $\angle COC$ RLC_0OC_0 の変形後の位置; α 第1主軸が x 軸となす角, α' 歪楕円長軸が x 軸となす角。

みによる変形量をマイナスにとった。上に述べた“最大、最小の歪”とは、この符号も考え併せた代数的な意味での大小である。従って、第19図に示したようにのびとちぢみの両方が現われる場合には、長軸方向に最大ののび、短軸方向に最大のちぢみが生じる。変形が、すべての方向にのびる場合には長軸方向に最大ののび、短軸方向に最小ののびがおき、すべての方向にちぢむ場合には、長軸方向に最小のちぢみ、短軸方向に最大のちぢみがおきたことを示す。

歪楕円の長、短軸についてのもう一つの特徴は、これらが変形前にも直交していたことである。物体内の、互に直交した2直線は均質歪によって一般に斜交する。しかし、特別な1組だけは変形後も直交性を保つことが証明される。歪楕円の長短両軸はこの特別な1組である。この両軸が変形以前にあった方向は、夫々歪の主軸と呼ばれる。第19図の単位円の2つの直径

A_0A_0 および B_0B_0 が、この場合の歪の主軸である。

歪の主軸に沿う長さは、均質歪によって最大、最小の変形を起して、歪楕円の長短両軸 AA (長さ $2A$) および BB (長さ $2B$) となる。最大、最小の歪を $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{A-1}{1} = A-1 \\ \varepsilon_2 &= \frac{B-1}{1} = B-1 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

であり、これらは主歪の大きさと呼ばれる。

4. 回 転 2本の歪の主軸が x 軸となす角を $\alpha, \alpha+\pi/2$ とし、変形後のそれらの位置、つまり歪楕円の長軸、短軸が x 軸となす角を夫々 $\alpha', \alpha'+\pi/2$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \tan(\alpha'+\alpha) &= \frac{b+c}{a-d} \\ \tan(\alpha'-\alpha) &= \frac{b-c}{a+d} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

の関係がある。 $\alpha'-\alpha$ は、この変形による歪の主軸の移動角であって、“回転 (rotation)” と呼ばれる。回転には正負の符号をつけて、その回転の向きを区別する。 $b=c$ なるときは、

$$\alpha'-\alpha = 0 \quad (22)$$

となり、この歪は非回転であるという。

2本の歪の主軸 ($\alpha, \alpha+\pi/2$) のどちらが歪楕円の長、短軸 ($\alpha', \alpha'+\pi/2$) になるかは、平行四辺形の形によって定める。

5. 最大剪断歪 物体内の直交2直線は、均質歪によって一般に斜交 (歪の主軸のみは例外) することは前に述べた。直交2直線の交角が、変形後 ($\pi/2-\beta$) になった場合、

$$\gamma = \tan \beta \quad (23)$$

を、変形前のこの2直線の方向に関する剪断歪 (shear strain) の大きさという。剪断歪は、はじめの直交2直線の方向のとり方によって大きさが変化し、その変化の様子は、

$$2h^2 \tan \beta = 2(ab+cd) \cos 2\theta + (b^2+d^2-a^2-c^2) \sin 2\theta \quad (24)$$

で与えられる¹¹⁾。但し、

$$h^2 = ad-bc$$

$$\theta = \text{直角2直線のひとつが } x \text{ 軸となす角}$$

である。

歪の主軸の方向では剪断歪は0で最小値を示す。最大剪断歪は2つの歪の主軸の2等分線の方角で起り、その値は、

$$\gamma_{\max} = \frac{A^2-B^2}{2AB} \quad (25)$$

である。この直交2直線の変形後の方向は、歪楕円の長短両軸端でこれに外接する矩形 $pqr s$

の対角線に一致する。

6. 体積変化 均質歪によって、物体の実質部分が一樣に膨脹または収縮することがある。厚みの変化がない場合には体積変化は面積変化となって現われる。

今、均質歪によって単位円 (半径=1) が、長短両軸が夫々 $2A$, $2B$ なる楕円に変形したとすると、体積変化は、

$$\frac{\text{歪楕円}}{\text{単位円}} = \frac{\pi AB}{\pi} = AB = h^2 \quad (26)$$

但し、

$$h^2 = ad - bc$$

である。 (h^2-1) は体積変化率 (dilatation) とよばれ、変形による実質部分の膨脹または収縮の様子を示す。つまり、

$$h^2 - 1 \begin{cases} > 0 \text{ ならば膨脹} \\ = 0 \text{ ならば等積} \\ < 0 \text{ ならば収縮} \end{cases}$$

である。

Summary

Direct observation of strain ellipse in snow cover on the slope was carried out at Avalanche Research Station, Toikanbetsu, northern Hokkaido. Four observation sites were set on the slope to study the effect of exposure of the slope and that of distance from ridge top on the behavior of snow cover on the slope; site A and B on the south slope, C and D on the north slope (Table 1).

Small holes, 1 cm in diameter and 60~130 cm in length, were bored in the snow cover in parallel to the contour line of the slope, the grand line of the observation, by use of a boring instrument (Figs. 3-7). At the start, holes were arranged along a vertical straight line, linear arrangement, and on a circle, circular arrangement (Plate I A-1, Plate II B-1, Plate IV C-1, and Plate VI D-1). Displacement of individual hole and deformation of those configurations were measured at every about 2 weeks (Table 3), on a vertical wall of the snow cover which was parallel to the maximum slope line. A new observation wall was made for each observation, at advanced position along the grand line by 30~50 cm, to avoid the end effect by the exposed and processed observation wall. The hole was deepened in parallel to the contour line of the slope, by use of the boring instrument, when it became too shallow to make the next new observation wall. The internal strain of the snow cover was intermittently observed through the snow season by this procedure.

Internal strain of snow cover was,

- (1) non-uniform for the whole snow cover as a body (Fig. 12),
- (2) uniform in each component layer of snow cover (Fig. 14),
- (3) occasionally non-uniform even in a component layer, in active snow melt season (Fig. 15).

Strain was defined as positive for extension and negative for compression in this

paper. Principal strains in the snow cover appeared as follows :

- ϵ_1 : Maximum extension was observed in some direction around the horizontal on the observation wall.
- ϵ_2 : Displacement of snow in parallel to the contour line of the slope can be considered zero for an uniform slope.
- ϵ_3 : Maximum compression was observed in some direction around the vertical.

Strain rate ($\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_3$ and $\dot{\gamma}_{\max}$), condition and properties of the snow cover (\bar{W}_n load by upper snow layer along the normal line of the slope, \bar{R} hardness of snow by Kinosita's gauge, and G snow density), and weather condition (\bar{T} air temperature, and I solar radiation absorbed by snow cover) at individual site are shown in Fig. 16.

The observation at site B suggests that strain rates of a snow cover are predominantly affected by the mechanical strength of snow which may vary with change of temperature. Maximum value of the strain rates of the snow cover appeared during the period 4 (Fig. 16), and ground avalanches were recorded most frequently during this period at the south slopes in this district.

Structural feature and movement behavior of snow cover on the south-and north-slope showed some remarkable difference. Strain rates of snow cover varied through the snow season at the south slope, but fairly steady at the north slope until the snow melt season (Fig. 16). Such facts may be caused by difference of solar radiation energy absorbed by snow cover on respective slope (Table 2). Solar radiation energy absorbed by snow raises snow temperature, and it results in activating the warm metamorphosis of the snow¹⁴⁾, and in weakening the mechanical strength¹⁷⁾ of it.

Under the assumption that the principal axes of stress and those of strain have the same directions, principal stresses in the snow cover, σ_1 and σ_3 , were calculated. At the point II of Fig. 17 and 18, principal stresses, σ_{II1} and σ_{II3} , were calculated by Haefeli's formula²⁾. Namely,

$$\sigma_{II1} = z\rho_s \left\{ \cos \beta - \sin \beta \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_{II3} = z\rho_s \left\{ \cos \beta + \sin \beta \cot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

where, z depth normal to the slope, β inclination of the slope, ψ creep angle, and ρ_s snow density. At the point I principal stresses, σ_{I1} and σ_{I3} , were calculated considering the equilibrium of snow column I and III (Fig. 17, 18).

$$\begin{aligned} \sigma_{I3} &= \sigma_{A'B'} + w_1 \cos \alpha_{II} \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_{II1} + \sigma_{II3}) - \frac{1}{2}(\sigma_{II1} - \sigma_{II3}) \cos 2(\alpha_{II1} - \alpha_{II}) + w_1 \cos \alpha_{II} \end{aligned} \quad (5), (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{I1} &= \sigma_{E'F'} + w_3 \sin \alpha_{II} \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_{II1} + \sigma_{II3}) + \frac{1}{2}(\sigma_{II1} - \sigma_{II3}) \cos 2(\alpha_{II1} - \alpha_{II}) + w_1 \frac{\sin \alpha_{II}}{\sin(\beta - \alpha_{II})} \end{aligned} \quad (8), (10), (12)$$

Those values were compared with those by Haefeli's method for deep level of the snow cover, D-I and D-II, at the site D, in Table 5. They showed fairly good agreement with Haefeli's, with some general tendency that σ_1 appeared slightly bigger and σ_3 smaller in magnitude than Haefeli's (Fig. 17).

Finally, viscosity coefficient of confined snow for extension η'_e and that for compression η'_c were calculated (Table 5), by the definition of,

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{\eta'_e} \quad (\text{for extension}) \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \frac{\sigma_3}{\eta'_c} \quad (\text{for compression}) \quad (14)$$

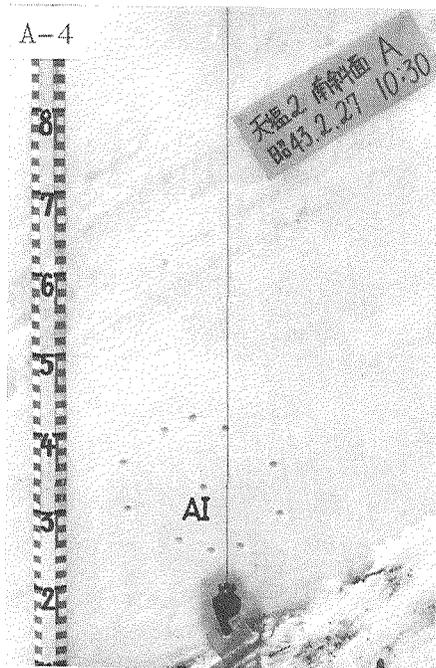
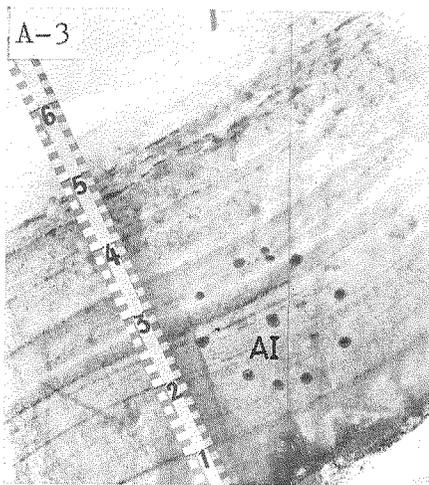
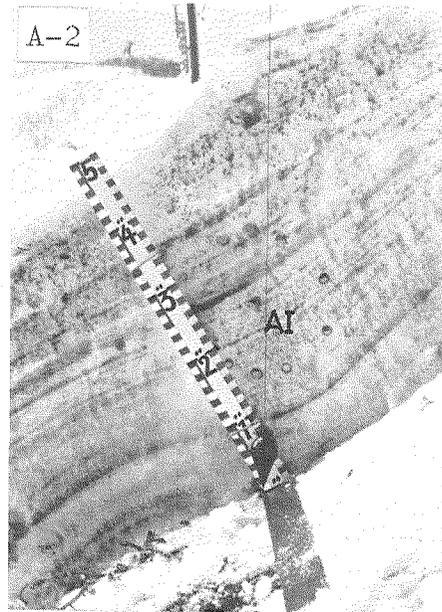
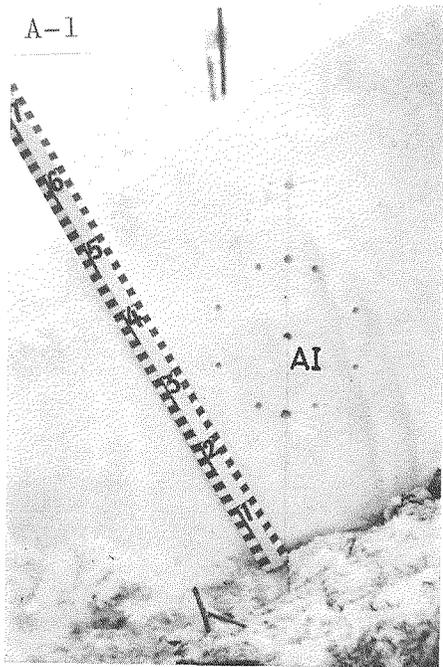
η'_c appeared bigger than η'_e by several times for dry snow, and by several tens times for wet snow.

図 版 説 明

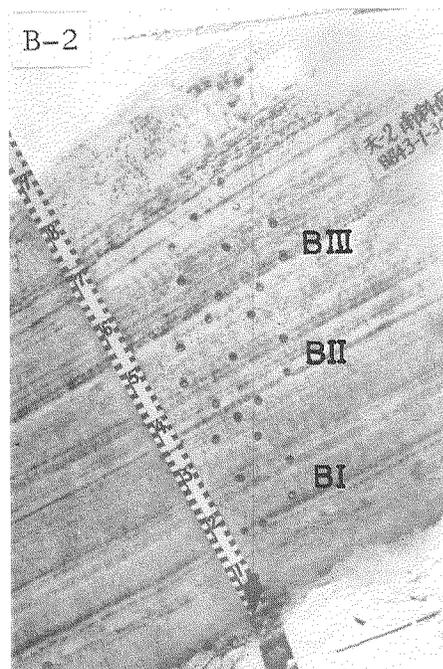
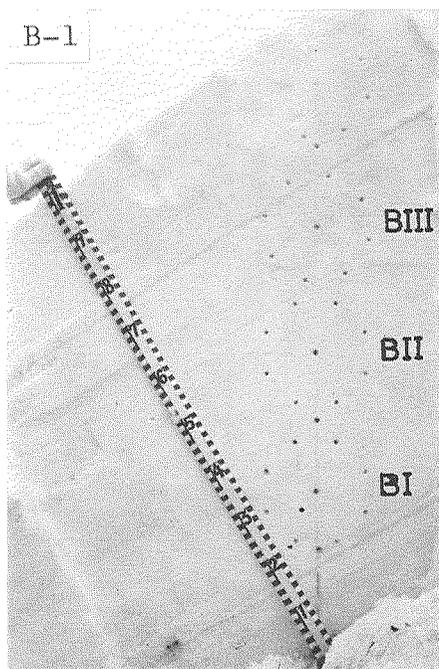
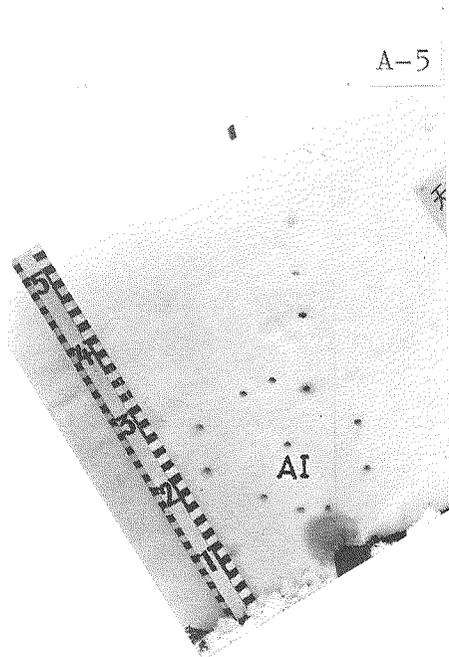
各観測点に於ける斜面積雪内部歪の進行。各写真中央附近の縦線（黒糸または観測面に刻まれた細溝。D-6, D-7 では黒い物尺）は鉛直線を表わす。雪尺は 1 cm 目盛である。

写真の下の記述例：

A-1, 1 月 18 日： 観測点 A に於ける第 1 回観測，昭和 43 年 1 月 18 日。

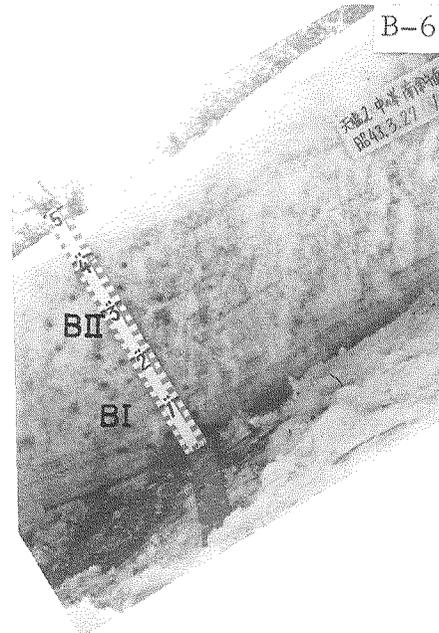
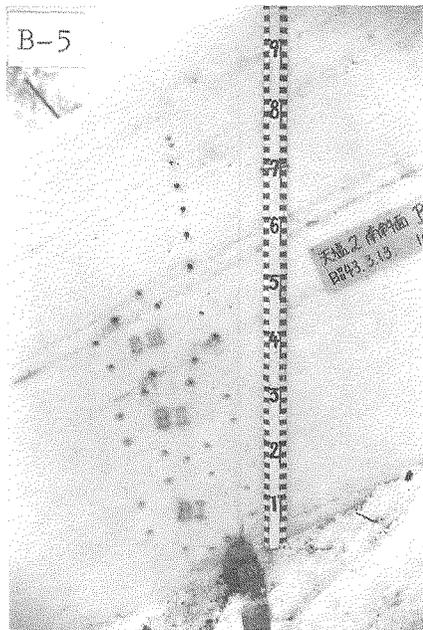
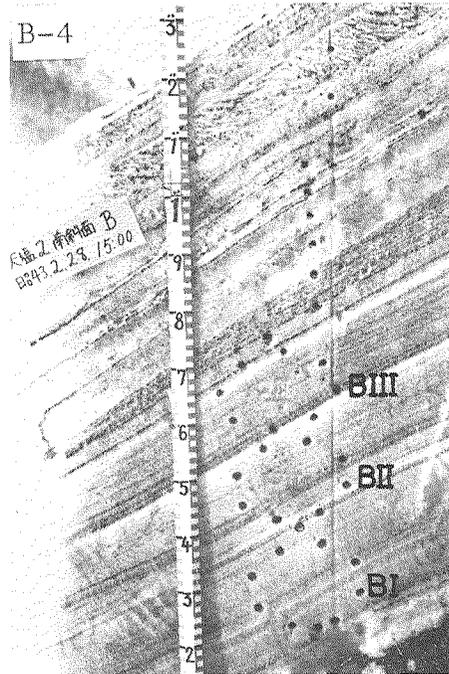
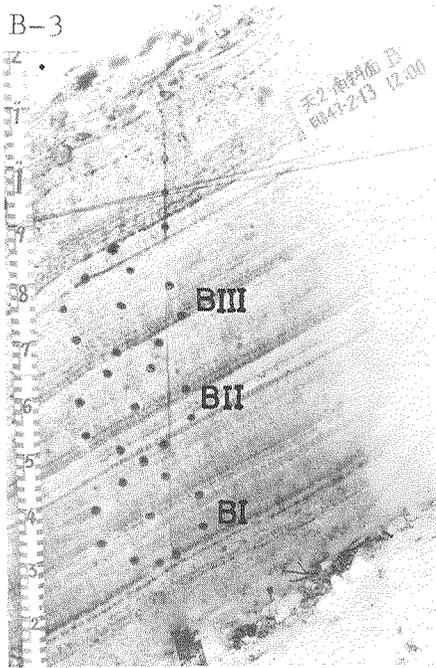


A-1, 1月18日; A-2, 1月30日
A-3, 2月13日; A-4, 2月27日

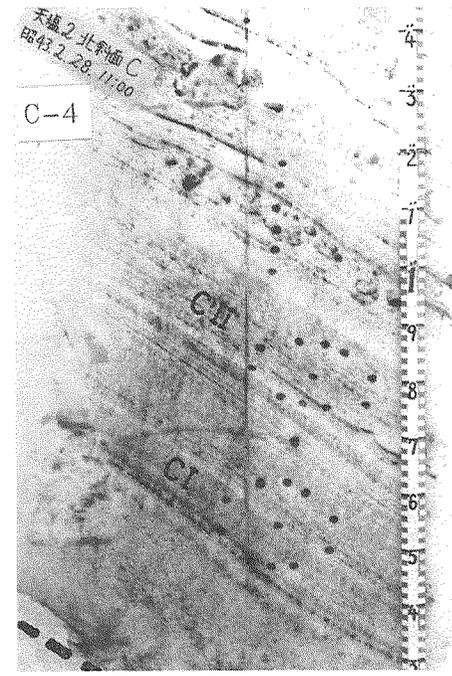
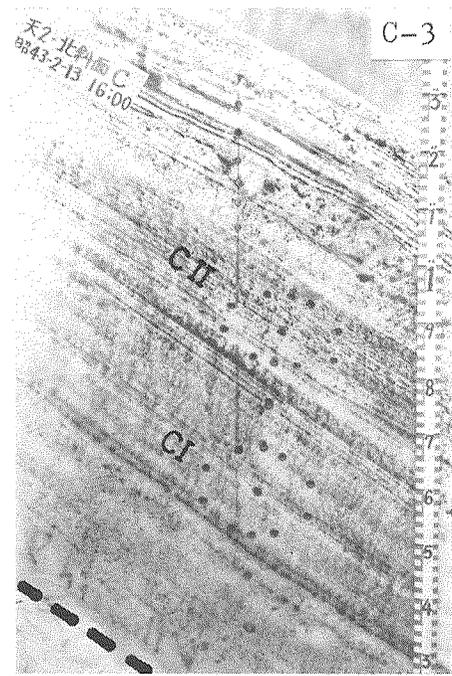
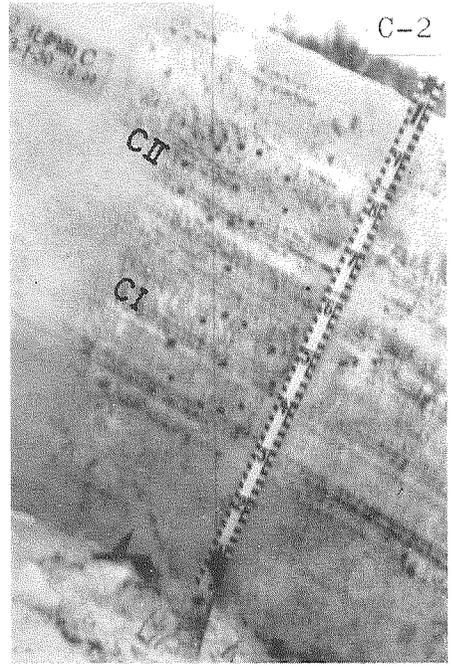
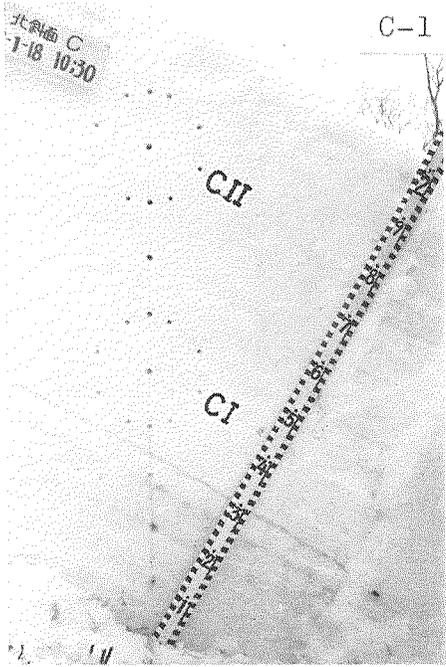


A-5, 3月13日

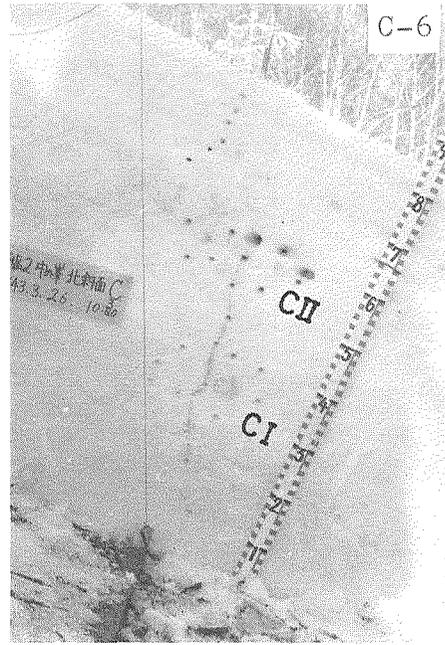
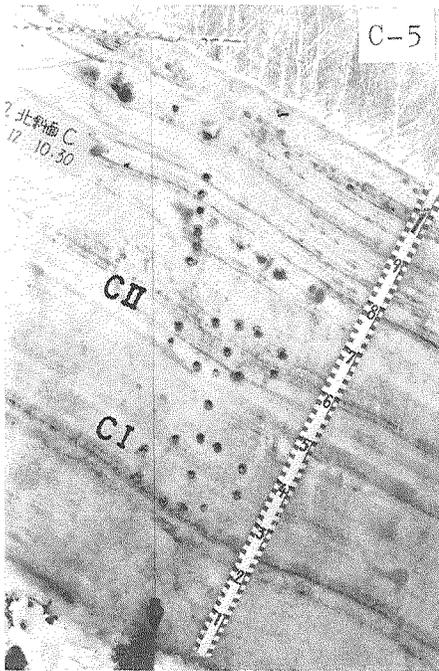
B-1, 1月19日; B-2, 1月30日



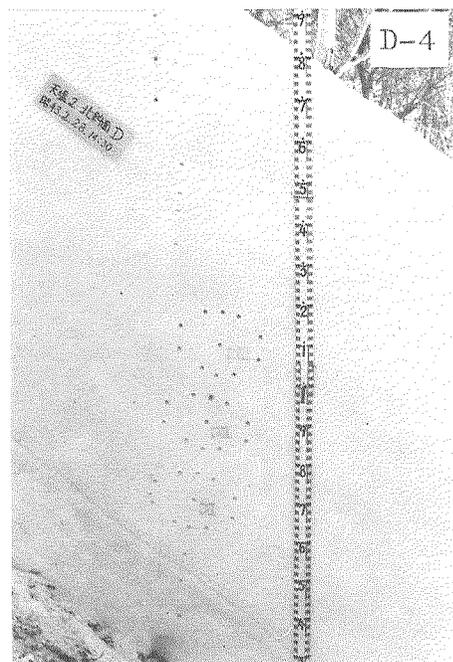
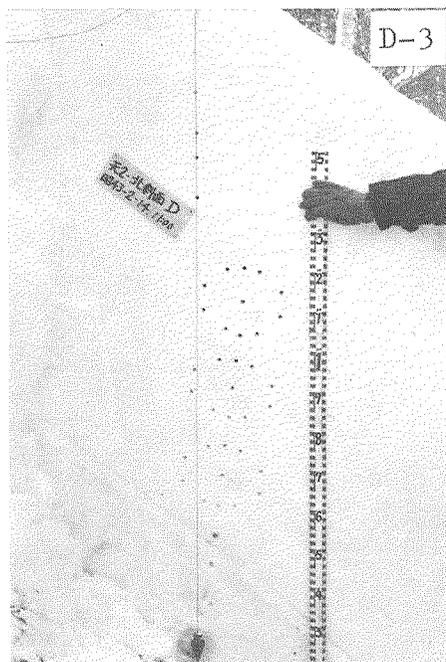
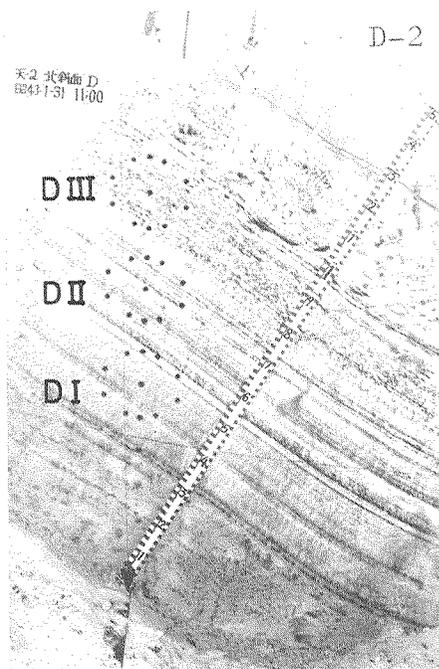
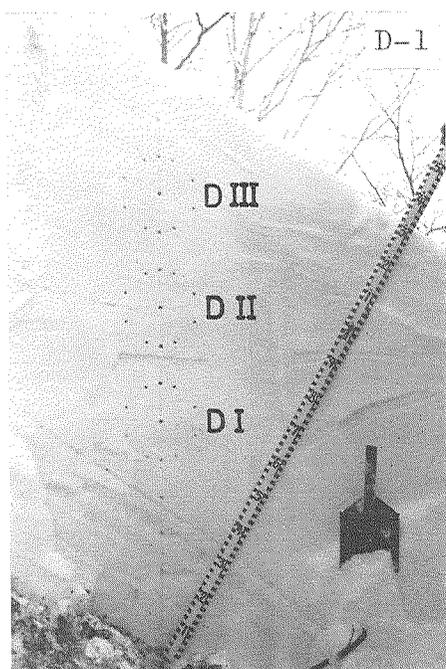
B-3, 2月13日; B-4, 2月28日
B-5, 3月13日; B-6, 3月27日



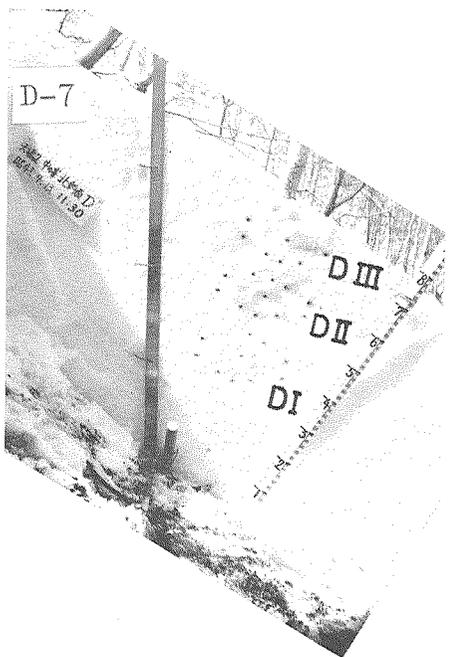
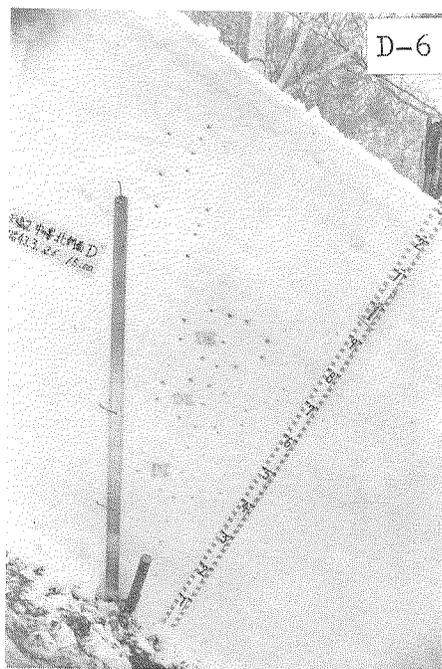
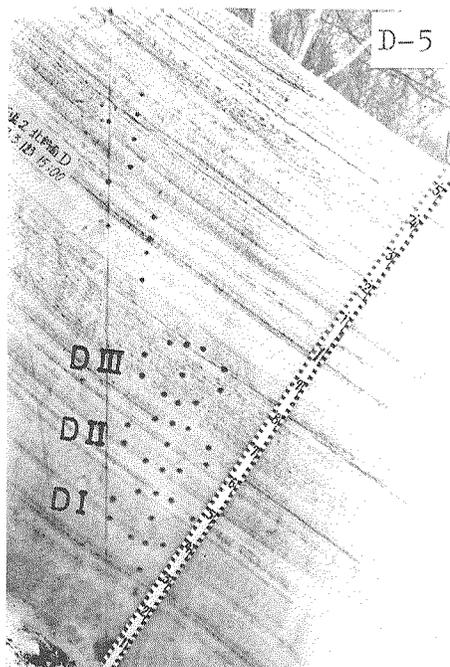
C-1, 1月18日; C-2, 1月30日
C-3, 2月13日; C-4, 2月28日



C-5, 3月12日; C-6, 3月26日



D-1, 1月18日; D-2, 1月31日
D-3, 2月14日; D-4, 2月28日



D-5, 3月13日; D-6, 3月26日
D-7, 4月13日