



Title	斜面積雪の挙動の研究 II : 変位、歪、底面すべり
Author(s)	秋田谷, 英次; AKITAYA, Eizi; 川田, 邦夫 他
Citation	低温科学. 物理篇, 29, 135-149
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18177
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p135-149.pdf



斜面積雪の挙動の研究 II*

— 変位, 歪, 底面すべり —

秋田谷 英次
(低温科学研究所)

川田 邦夫
(北海道大学大学院 理学研究科)
(昭和46年9月受理)

I. ま え が き

斜面に積った雪は、緩慢ではあるが、絶えず斜め下方に向って変位する。この変位は斜面の雪の塑性流動と接地面での滑りの2つの運動によって引き起される。これら2つの雪の動きのうち、前者はクリープ現象、後者は底面すべり(グライド)現象と呼ばれている。積雪内のある点における変位の方向や大きさ、すなわち変位ベクトルの大きさは、場所ごとに異なっているため、積雪には歪が生ずる。歪や変位量の測定は、古くは Haefele¹⁾、桜井²⁾にはじまり、その後多くの研究者によって行なわれて来た。最近になって、北海道北部にある低温科学研究所、雪崩観測実験室のある実験斜面で、清水³⁾、藤岡⁴⁾等による研究が行なわれてきた。

筆者等は、1970~1971年の冬に同じ実験斜面において、新しい観測方法により、変位や歪の観測をはじめたので、その結果をここに報告する。なお、清水、藤岡等は1冬を通じての長期的な観測を行なってきたが、筆者等の行なった1回の観測期間は数日程度と短いものである。その期間内に数十分ないしは、数時間ごとの測定を行ない、変位や歪の大きさの、短時間内の変化を知ることが主眼とした。観測は上にのべた雪崩観測所近くの南北両斜面において行なわれた。斜面の植生状況は、両斜面とも笹に覆われ、南斜面には木はなく、北斜面には白樺の疎材があった。

II. 観 測 方 法

斜面の最大傾斜線にそって積雪の鉛直断面をつくる。測定しようとする積雪層に、測点としての目印となるものを挿入し、その位置の変化を適当な時間間隔で測定する。測点は積雪の動きといっしょに動くものでなければならない。そのためには自重で沈降したり、積雪の動きを乱さないように、軽くて小さなものでなければならない。ここでは、断熱材として使用されている発泡樹脂(スタイロフォーム)の1cm角で長さ7~8cmの棒状に切ったものを用いた。この棒に虫ピンの頭を切取ったものを、先端1~2mm残して、差し込んでおく。この測点とな

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1150号

る発泡樹脂の棒を、積雪の断面に垂直に差し込んだ。

1) 変位量の測定

地面に不動点を設け、この点を基準として積雪中の測点（発泡樹脂の棒）の、ある一定時間内の移動量を測定すれば、この測点の変位量がえられる。この変位量は、雪のクリープ量と底面すべり量のベクトル的に合成されたものである。変位量の測定法として、視差測定棒による方法と読取顕微鏡による方法の2つの方法を用いた。

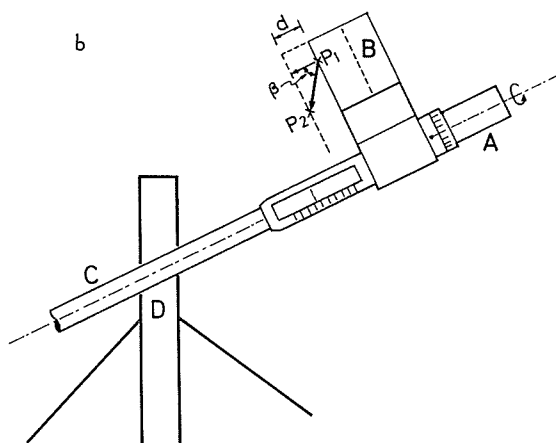
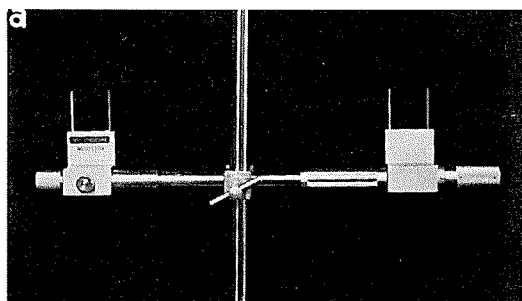
a 視差測定棒による方法

第1図 a に視差測定棒、b に測定法の概略を示した。地面に6 cm 角で長さ80 cm あまりの木杭を半分程打ち込み、この杭に直径15~20 mm のステンレス製のパイプを針金で縛りつける。更にこのパイプが動かない様にワイヤーロープで支えをとっておく。このパイプに視差測定棒を、斜面に平行になるように固定する。

第1図 b において、A の環を回転すると、棒についている透明な板 B が棒にそって平行移動する。A には1/20 mm の目盛がついている。最初、測点が P_1 の位置にあったとする。このとき、 P_1 と透明板 B の左端が一致するように、A を回転させる。時間がたつと測点は P_1 から P_2 まで移動している。再び環 A を回転して、板 B を点線で示した位置まで移動させる。板 B は斜面方向に d だけ移動したわけである。今測定した d は、実際の変位 $\overrightarrow{P_1P_2}$ ではなく、 $\overrightarrow{P_1P_2}$ の斜面方向の成分である。我々が視差測定棒で測定した値は全て、変位ベクトルの斜面方向の成分 d である。斜面と $\overrightarrow{P_1P_2}$ のなす角 β を変位角となづける。

b 読取顕微鏡による方法

上にのべた方法では、変位ベクトルの斜面方向の成分しか測定出来ない。そこで読取顕微鏡を用い変位ベクトル、すなわち変位の大きさと方向を測定した。第2図に測定中の写真を示した。a と同様に積雪の断面をつくり、測定しようとする層に測点を埋め込む。a では発泡樹脂の棒に虫ピンを差し込んだが、顕微鏡では見えにくいので、虫ピンは用いなかった。長さ1 cm あまりのガラス釘の頭を砥石で磨き、なめらかにする。この面に鋭利な刃物で細い十字線を刻み、これを発泡樹脂の棒に差し込み、測点とした。顕微鏡では、虫ピンの先端より、十



第1図

a 視差測定棒

b 測定法の概略

A マイクロメーターネジの環, B 透明板, C 棒, D 支柱, $\overrightarrow{P_1P_2}$ 変位ベクトル, β 変位角, d 変位ベクトルの斜面方向の成分, A を回転すると透明板 B は棒 C にそって移動する。このときの移動量 d が変位ベクトルの斜面方向の成分となる。

字線の方が見やすく、視準線と一致させるのが容易である。

積雪断面の近くに、木の杭を4本打込み、適当な高さで杭の頭を水平にそろえて切断し、この上に平らな板をのせて固定する。これが顕微鏡をのせる台で、杭に横板をうって十分に補強し、ワイヤーロープで支えをとっておく。顕微鏡の鏡筒を水平にし、鏡筒が雪の断面に垂直になるように、台の上ののせる。こうすると鏡筒は水平および鉛直方向に移動し、副尺を使用するとその移動量は1/100 mmまで読取ることができる。測点の移動をこの読取顕微鏡で追跡することにより、雪の断面に平行な直角座標に対する測点の位置が決定できる。

2) 斜面方向の雪の歪

積雪断面上で、適当な距離だけはなれた、2つの測点を設ける。この2点間のはじめの距離を l 、ある時間を経た後の距離を l' とすれば、長さの歪は、 $(l'-l)/l$

として求めることができる。測点としては、**a**で述べた発泡樹脂の棒に、虫ピンを差したものをを用いた。距離の測定は、次の3つの方法によった。

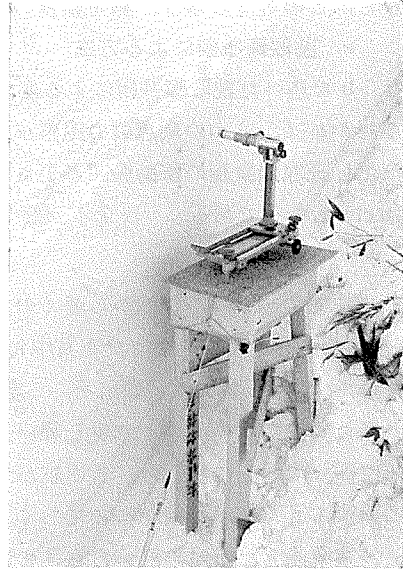
c 鋼巻尺（スチールテープ）による方法

積雪断面の任意の層内で、3~5 m はなれた位置に2つの測点を設ける。測点間の距離測定には、最小目盛1 mmの鋼巻尺を用いた。巻尺の一端にはスプリング秤を取付け、7 kgの一定の張力になるように、両端で引張る。測定は目盛の位置を少しずつずらして、3回読取りをくり返した。両端の読取値の差が3回とも一致すれば、これを測点間の距離とする。一致しないときには、同じ値が3回得られるまでくり返す。殆んどの場合、最初の3回で同じ値になった。

鋼巻尺の線膨張係数は $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 程度で、長さ5 m、 10°C の温度差に対して、伸縮は1 mm以下なので、温度による補正は行なわなかった。

d 視差測定桿による方法

測定器具、方法は**a**の変位量の測定と、ほぼ同じであるが、器具に多少改良を加えたので、改良型測定桿と呼ぶことにする。変位の測定には、桿の一端についた透明板のみを使用した。歪の測定には、桿を3倍あまり伸ばして75 cmとし、他端にも同様な透明板をつけた。桿は**a**の場合と同様な方法で、層に平行に設置し、両方の透明板付近に測点を挿入する。2枚の透明板を移動させることにより、2つの測点の斜面方向の移動量がわかり、その差から、斜面方向の長さの歪を知ることができる。一方の透明板の移動量は、桿についているスクリーンで測定したが、他端の値は、1/20 mmまで測れるノギスで測定した。この場合、温度による桿の伸縮を計算すると、 10°C の温度変化に対して約0.1 mmの長さが変化することになる。し



第2図 読取顕微鏡による変位量の測定、積雪断面中央に6この測点がある

かし、この程度の値は、測定誤差の範囲と考え、温度による補正はしなかった。

e 読取顕微鏡による方法

bで述べた読取顕微鏡による変位量の測定では、各測点の座標を測定した。各測点の座標がわかれば、2つの測点間の距離が求まり、その時間的变化から、歪および歪速度が求まる。ただし読取顕微鏡の移動範囲が小さいため、測点間の距離は上の2つの方法に比べて小さく、10 cm あまりである。

3) 底面すべり

底面すべりは、以前から多くの人々によって行なわれてきた、オガクズを用いる方法でしらべた。雪がかなり積った1月中旬、積雪水量測定用の長さ3 mの採雪筒又はラム硬度計を使って、斜面の最大傾斜線にそって数 m 間隔に、積雪に鉛直に穴をあける。穴の直径は約4 cm あった。この穴の直径より少し細い長さ10 cm あまりの木の杭を穴の中に入れ、この杭を細い棒を使って地面に打込む。この杭がすべりを測定するときの基準点となる。穴の中には、表面に達するまでオガクズをつめておく。積雪の中に鉛直なオガクズの柱ができ、柱の下の地面には、基準点となる木の杭が打ち込まれたわけである。適当な日数をへて、この場所の積雪を掘ると、オガクズの柱は雪のクリープで傾き、同時に柱の下端は基準点である杭の位置より、斜面下方に移動している。この移動量がその点の積雪底面のすべり量である。2点間の底面すべり量の差から、底面の積雪の斜面方向の歪が得られる。

III. 観測結果

1) 変位量について

1971年1月中旬から3月下旬まで、5回にわたって変位量の測定を行なった。1回の測定の継続時間は、30時間から90時間であった。その結果を第1表に示す。表中 No. 1, 2, 6 は視差測定桿, No. 9, 10 は読取顕微鏡による結果である。No. 11 はオガクズによる底面すべり量で、変位量と比較するためにかかげておいた。

表中の積雪深は斜面に垂直に測った値、測定位置は測点としての目印を挿入した位置で、斜面に垂直に測った高さである。次に測定番号順に、観測地点、変位の特徴について説明する。

No. 1

尾根中央から斜面にそって約12 m 下った位置に積雪断面をつくり、下から60 cm, 77 cm の2カ所に測点を設けた。この部分の積雪はこしまり雪で密度は $0.13\sim 0.15 \text{ g/cm}^3$ の範囲であった。この値は今回我々が変位量を測定した積雪層では一番小さな値である。一般に変位速度は表面に近い程大きくなるが、この場合は反対に、地面から77 cm の高さの測点Aより、60 cm の高さのB点の方が、変位速度が大きく、平均 8.4 mm/day であった。

No. 2

尾根から斜面長で40 m 下方に、なだれ防止柵が設置されている。この柵が雪の変位量に、どのような影響を与えているかを調べるため、柵の上下の同じ積雪層で変位量の測定をおこなった。No. 2 のAは柵から斜面にそって1.4 m 上方、Bは0.5 m 下方である。柵の上の方が積雪

第1表 変位速度

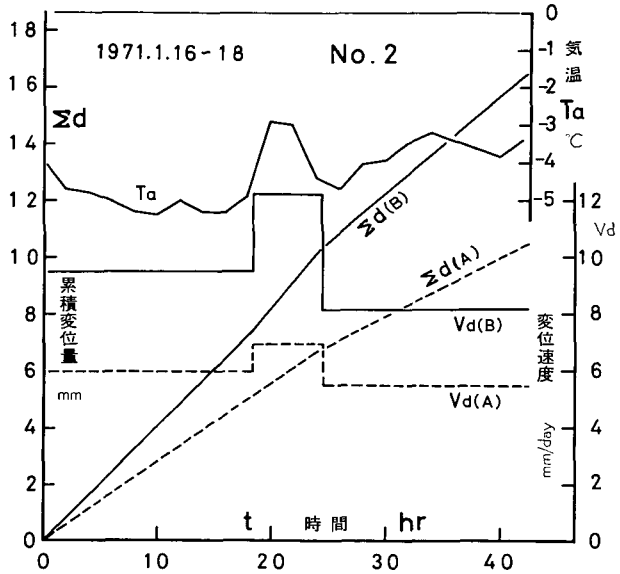
No. 1, No. 2, No. 6 は視差測定桿による測定で、変位速度は斜面方向の成分 d , No. 9, 10 は読取顕微鏡によるもので、実際の変位速度 \dot{d} , No. 11 は底面すべりの速度

測定番号	測定月日	斜面の向き	積雪深 (cm)	測定位置 (cm)	表面傾斜 (度)	平均気温 (°C)	雪質	密度 (g/cm ³)	変位速度 (mm/day)														
									最小	最大	平均												
No. 1 A	1/14~1/16	南	90	77	23	-6.4	こしまり	0.13~0.15	2.9~	9.6	8.2												
												B	"	"	60	"	"	"	"	3.1~	9.9	8.4	
No. 2 A	1/16~1/18	南	95	80	21	-4.3	こしまり	0.18	5.5~	6.9	5.9												
												B	"	"	85	75	35	"	"	"	8.2~	12.2	9.3
No. 6 A	1/24~1/27	北	48	25	14	-7.0	こしまり	0.15~0.16	0.0~	0.1	0.06												
												B	"	"	67	47	19	"	"	"	1.3~	1.8	1.7
												C	"	"	110	90	31	"	"	"	4.8~	5.4	5.1
												D	"	"	82	59	37	"	"	"	1.3~	4.1	3.5
No. 9 A	2/20~2/24	南	90	80	23	-5.7	しまり	0.30	5.6~	12.1	7.1												
												B	"	"	"	74	"	"	"	"	4.0~	11.9	6.5
No. 10	3/25~3/26	南	105	75	25	+1.1	しまり	0.35	4.9~	12.7	7.4												
No. 11 A	1/27~3/28	南	115	0	20						1.0												
												B	"	"	127	0	30					3.7	

深が多く、A点に対応するB点の積雪層は、75 cmで、A点より5 cm少なくなっている。A点では雪の動きが柵で阻止されているため、変位速度は小さく、B点ではA点より大きくなっている。第3図にA, B点の累積変位量 Σd , 変位速度 V_d と気温 T_a の関係をグラフで示した。日中の温度の高い時には、変位速度も大きくなっている。

No. 6

No. 6 は北斜面での測定である。尾根から、斜面にそって長さ25 mあまりの長い断面をつくり、表面から20 cmあまり下層にA, B, C, D 4箇の測点を設けた。測点A, B, C, Dの尾根からの距離は、斜面にそって、それぞれ3, 10, 17, 24 m



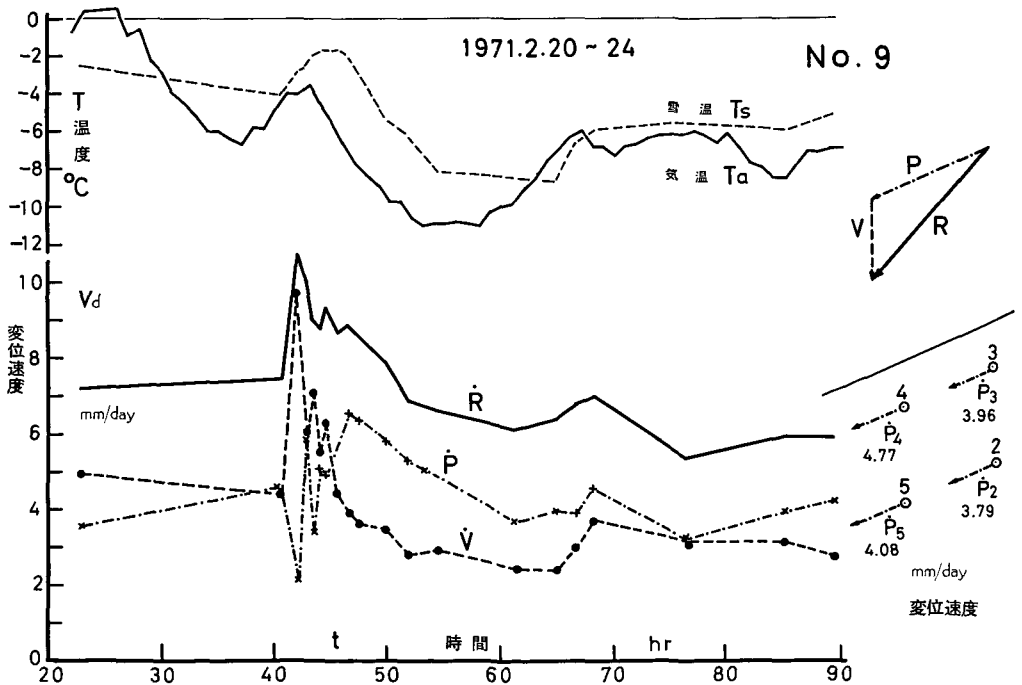
第3図 累積変位量 Σd , 変位速度 V_d と気温 T_a の変化
A 点は柵から 1.4 m 上方, B 点は 0.5 m 下方

である。尾根に近い A 点では傾斜がゆるいため、0.06 mm/day と一番小さな変位速度であった。B, C と傾斜が急になるにつれて、1.7, 5.1 mm/day と変位速度が大きくなってきたが、一番傾斜の急な D 点では 3.5 mm/day と C 点より小さくなっている。この理由は歪の項で説明する。

No. 9, 10

No. 9, 10 の2つは読取顕微鏡による測定で、No. 9 は2月末、No. 10 は3月末に行なわれた。測点の数は最初、No. 9 で6箇、No. 10 で4箇配置したが、途中で測定不可能な点がでたので、実際に使用したのは、No. 9 で4箇、No. 10 で2箇である。第4図に No. 9 の測点の配置、変位速度、気温及び雪温の変化を示した。測定法で述べたように、読取顕微鏡では、各点の座標を測定することから、変位ベクトル R がわかる(第4図右上)。 R は斜面に平行な成分 P と鉛直な成分 V に分解することができる。第1表 No. 9 の A の欄には表面に近い2つの測点(第4図右の測点番号3と4)の、B の欄にはそこから6 cm 下にある他の2つの測点(同じく2と5)の平均変位速度 \dot{R} をかかっている。4箇の測点(2, 3, 4, 5)の変位量の時間的変化のようすは、それぞれ似ていた。第4図に示したのは4つの測点の平均変位速度 \dot{R} , \dot{P} , \dot{V} である。

測定を開始してから40時間あまりたち、気温 T_a 、雪温 T_s が上昇してきたとき、測定の



第4図 読取顕微鏡による変位速度と気温の時間的変化

R は変位ベクトル, P, V は R の斜面方向および鉛直方向の成分。
 $\dot{R}, \dot{P}, \dot{V}$ はそれぞれの変位速度。測点の数は4箇(測定番号2, 3, 4, 5)でそれら測点の配置は図の右側に示してある。 $\dot{P}_2, \dot{P}_3, \dot{P}_4, \dot{P}_5$ は各測点の斜面方向の平均変位速度。

時間間隔を短くし、30分から1時間毎に測定を行なった。気温及び雪温の上昇につれて、変位速度 \dot{R} は急に大きくなり、その後次第に減少している。 \dot{R} を斜面方向 \dot{P} 、鉛直方向 \dot{V} に分解したものは、数時間にわたって速度の変動が大きく、しかも一方が増加したとき、他方は減少する傾向を示した。第4図に示されているものは、4測点の平均であるが、各測点とも同じ傾向を示した。その後の変位速度 \dot{R} 、 \dot{P} 、 \dot{V} はいずれも気温の変化に対応したふるまいを示している。

第4図の右下に、4つの各測点の斜面方向の全期間の平均変位速度 $\bar{P}_2 \sim \bar{P}_5$ を示した。これによると表面に近い方が、又斜面下方の点の方が、変位速度が大きくなっている。このことから、この部分の雪は斜面方向に伸び、伸びの量は表面に近い方が大きいことが分かる。

No. 10の測定は3月末に行なったもので、2つの測点の変位速度 \dot{R} の平均値を第1表に示した。このときには、観測点から5mあまり下方の積雪は全部、なだれで落下していた。No. 10では変位速度の大きな変動はなく、気温の変化に類似した動きを示した。変位角 β (斜面と R とのなす角) についてみると、No. 9の4つの測点は、ほぼ 34° 、No. 10の2つの測点は 46° であった。No. 10の方が斜面に沿う動きよりも、鉛直下方の動きの方が大きかったことになる。No. 11は底面すべりの値である。

2) 斜面方向の雪の歪について

測定法で述べたように、斜面方向の雪の長さの歪を、同一層内の同一高さにおける2点間の距離測定により求めた。多くの場合、積雪層と斜面は平行で、傾斜角はほぼ等しかったので、得られた長さの歪は、斜面方向の歪と考えて良い。簡単のために、この論文では斜面方向の雪の歪を単に歪と呼ぶことにする。

測定結果を第2表に示した。ここで測定番号が第1表の測定番号と同じものは、積雪の同じ断面で、変位量と歪の両方を測定したものである。No. 6の測定だけが北斜面で行なわれ、他の測定は南斜面で行なわれた。表中歪速度が正の値は伸び、負の値は縮みを表わす。

次に測定番号順に、個々の測定の説明を行なう。

No. 2' (鋼巻尺による測定)

変位の No. 2 で述べたなだれ防止柵と尾根の間で、柵の上方7~13mの間(尾根から下方27~33mの間)で行なわれたものである。斜面傾斜は 30° と急であるが、歪速度は他のものに比べて一番小さく、平均 $0.18 \times 10^{-3}/\text{day}$ であった。積雪は斜面方向に伸びも縮みもせず、斜面を流動していることになる。

斜面積雪を斜面方向に3つにわけ、麓近くの雪を圧縮領域、中間の部分を中立領域、尾根近くを引張領域とする分け方がある。No. 2' の測定は250mの長さをもつ斜面の尾根近くで行なわれたものであるが、斜面方向の歪が極めて小さかったことから、上の分け方からすれば中立領域の性格をもっていたことになる。測定が柵と尾根との間で行なわれたことがその理由の1つであろう。

No. 3 (鋼巻尺による測定)

No. 3は1つの断面の上、中、下の3層について測定されたもので、断面は尾根から17m下った所から始まり、22mまでの間につくられた。最初、2つの層に a, b 2本の測線を設け

第2表 雪の斜面方向の歪速度

No. 2', 3, 6, 7, 8 は鋼巻尺による, No. 5 は改良型測定桿,
No. 9,10 は銃取顕微鏡による。No. 11 は底面すべりから求め
た歪速度。歪速度正は伸び, 負は縮みをあらわす

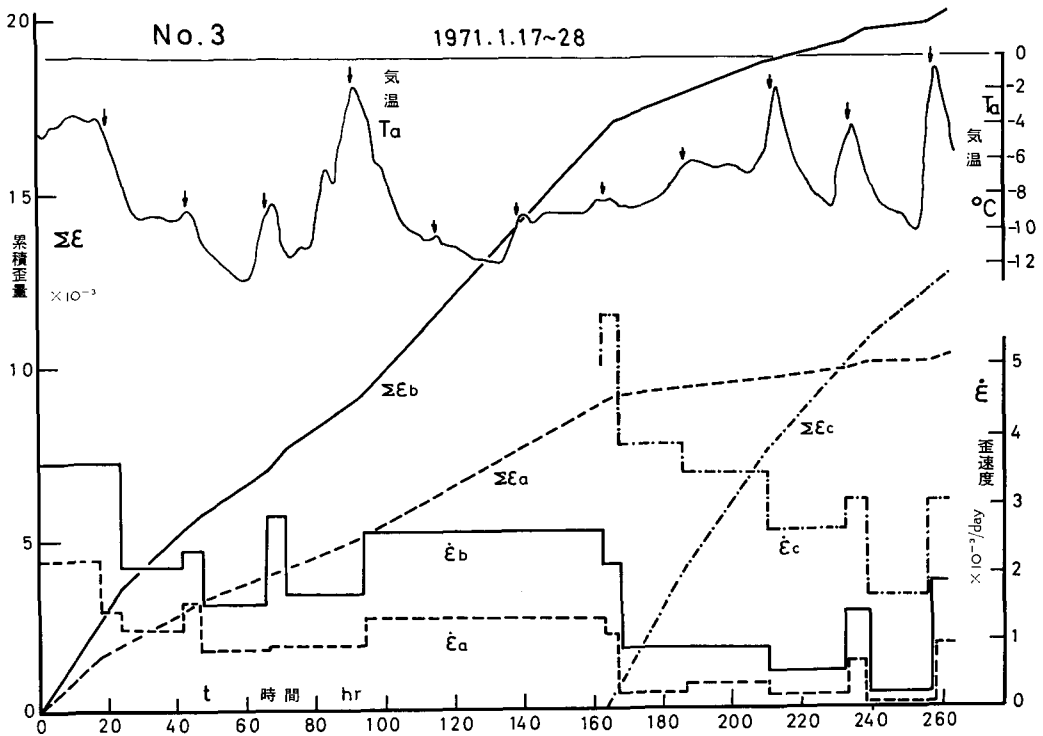
測定番号	測定月日	斜面の向き	積雪深 (cm)	測定位置 (cm)	測線の傾き (度)	平均気温 (°C)	雪質	密度 (g/cm ³)	測線長 (m)	歪速度 ($\times 10^{-3}/\text{day}$)		
										最小	最大	平均
No. 2'	1/16~1/19	南	80	65	30	-6.1	しまり	0.27	6.0	0 ~ 0.23	0.18	
No. 3	a	1/17~1/28	南	85	60	24	-7.8	こしまり→しまり	0.15~0.30	5.5	0 ~ 2.2	0.9
	b	"	"	73	"	"	"	0.15~0.27	5.5	0.2~ 3.6	1.8	
	c	1/24~1/28	"	126	106	"	"	こしまり	0.13~0.15	5.3	1.6~ 5.7	3.0
No. 5	1/18~1/21	南	100	80	21	-8.6	こしまり	0.19	0.7	-0.1~-1.8	-1.6	
No. 6	a	1/24~1/27	北	62	40	18	-7.0	こしまり	0.15~0.16	5.5	0 ~ 0.8	0.2
	b	"	"	115	97	28	"	"	5.0	0.3~ 0.9	0.5	
	c	"	"	"	93	34	"	"	4.8	-0.9~ 0.0	-0.3	
No. 7	a	1/26~1/28	南	104	84	11	-6.4	こしまり	0.15~0.18	4.4	0.3~ 1.2	0.7
	b	"	"	112	92	17	"	"	5.0	-0.6~ 0	-0.4	
	c	"	"	141	121	20	"	"	4.7	1.8~ 3.4	2.7	
No. 8	a	2/22~3/ 2	南	102	30	24	-8.3	しまり	0.40	2.9	0.3~ 1.1	0.7
	b	"	"	"	66	21	"	"	0.35	2.9	0.8~ 1.3	1.1
	c	"	"	"	92	19	"	"	0.30	2.8	1.1~ 1.9	1.4
No. 9 (3.4)	2/20~2/24	南	90	80	23	-5.7	しまり	0.30	0.1	-6.0~19.8	2.2	
	(2.5)	"	"	75	"	"	"	"	0.1	-1.7~24.7	2.5	
No. 10	3/25~3/26	南	105	75	25	+1.1	しまり	0.35	0.1	-3.0~10.6	1.7	
No. 11	1/27~3/28	南	121	0	23				5.9		0.5	

て, 歪を測っていたが, 途中で降雪があり, 積雪深が増加したため, 新しく積った層に測線 c を設けた。測線は下層から順に a, b, c となっている。第2表によると, 下層の古い雪ほど密度は大きく, 歪速度は小さくなっている。

第5図に, 各測線の歪速度 $\dot{\epsilon}$, 累積歪量 $\Sigma\epsilon$, 気温 T_a の時間的变化を示した。累積歪量 $\Sigma\epsilon$ は, 観測期間の最初の測点間の距離 l_0 に対する歪で, 観測期間中の短期間の歪 ϵ の積算されたものに等しい。気温 T_a のグラフで矢印で示した位置は正午で, 正午頃気温 T_a は極大に達し, それに対応して歪速度 $\dot{\epsilon}$ が大きくなった。160 時間を過ぎた頃から, 測線 a, b の $\dot{\epsilon}$ は急に小さくなった。最大の $\dot{\epsilon}$ は, 一番上の積ってまもない雪の層で観測され, その値は, $5.7 \times 10^{-3}/\text{day}$ であった。

No. 5 (改良型測定桿による測定)

視差測定桿の桿を長くし, 両端で測点の移動量を測り歪を求めた。なだれ防止柵のすぐ上方で, 圧縮領域と考えられる部分である。測点は, 柵から上方 0.7 m と 1.4 m のところに設け,



第5図 歪速度と気温の時間的变化

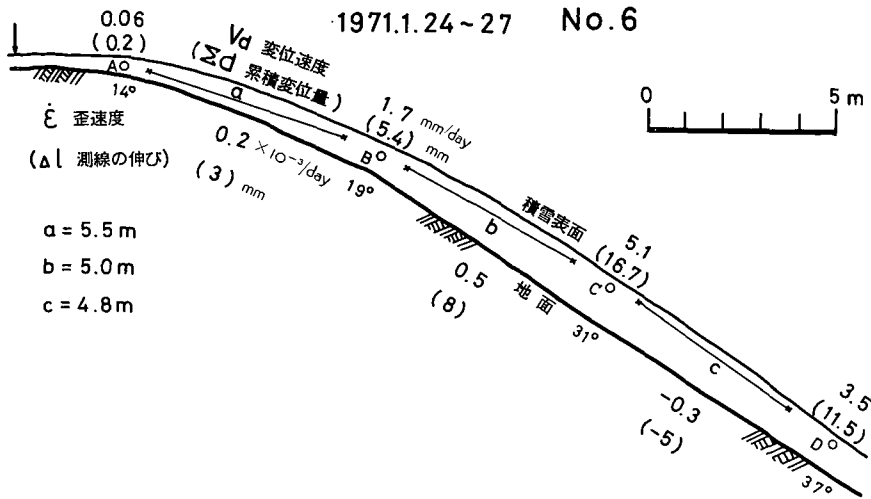
累積歪量 $\Sigma \epsilon$, 歪速度 ϵ , 気温 T_a , ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c はそれぞれ下層, 中層, 上層の値である。矢印は正午の位置を示す

測点間隔は 70 cm である。結果によると、この部分では縮みの ϵ があらわれ、平均の歪速度 ϵ は $-1.6 \times 10^{-3}/\text{day}$ である。柵に近い雪ほど、その移動は阻止されるため、斜面方向に圧縮されたわけである。

No. 6 (鋼巻尺による測定)

第1表の No. 6 の説明で述べたように、この場所では、同一断面で変位と歪の両方を測定した。第6図に斜面の形、測点の配置、変位速度、歪速度等を示した。積雪表面の上方には、平均変位速度 V_a 、累積変位量 Σd 、地面の下方には平均歪速度 ϵ と測線の伸び Δl を示してある。○印の A, B, C, D は変位用の測点、a, b, c は歪用の測線を表わしている。例えば、測点 B では観測期間中に測点は斜面方向に 5.4 mm 移動し、平均変位速度 V_a は 1.7 mm/day、測線 b は全体で 8 mm 伸び、歪速度 ϵ は $0.5 \times 10^{-3}/\text{day}$ 、c の測線は 5 mm 縮んだことを示している。

前に、断面の一番下方で傾斜の急な D 点の変位速度 V_a が、その上の C 点における V_a より小さいことをのべた。D 点から下方は直径 10~20 cm の白樺の林となっており、又観測終了後、積雪を掘って調べたところ、この近くではまだ、笹が完全に倒伏しないで積雪中に混入していた。これらの樹木と笹が積雪の流動を阻止していたわけである。そのため測線 c では、積雪が斜面方向に 5 mm 縮んだ。変位量はそれぞれ 16.7 mm と 11.5 mm で C と D の間で雪は 5.2 mm 縮んだことになるが、この値は丁度 $\Delta l = -5 \text{ mm}$ に一致している。



第6図 斜面の形，変位速度，歪速度

○印は変位量測定の見点。a, b, cは歪用の測線。V_aは平均変位速度， Σd 累積変位量， $\dot{\epsilon}$ 歪速度， Δl 測線の伸び。矢印は尾根の背の位置

No. 7 (鋼巻尺による測定)

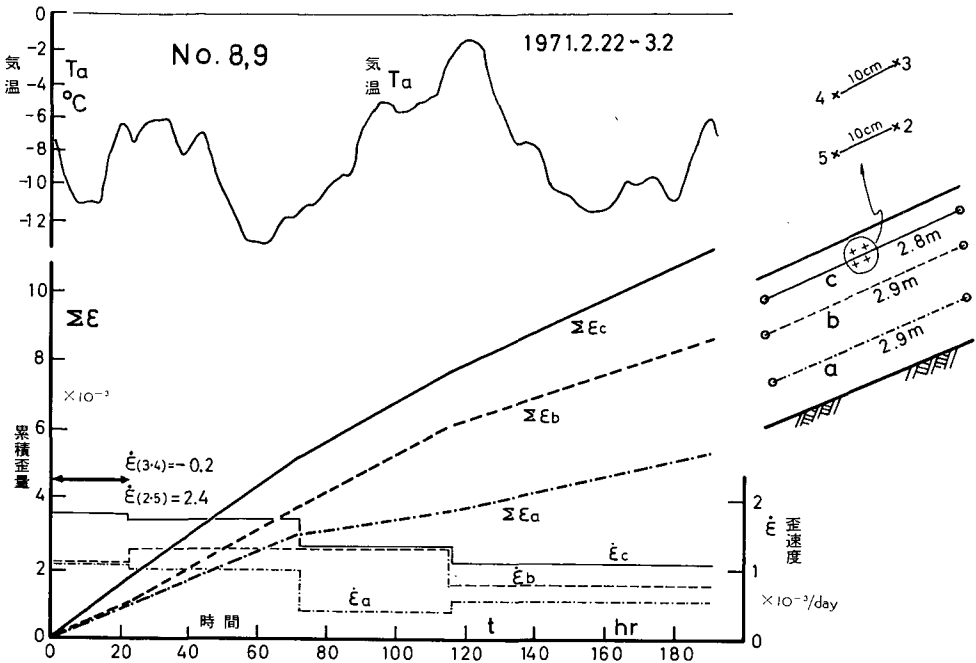
南斜面で尾根から、約4, 8, 13, 18 m 下ったところに測点を設けた。測点の表面からの深さは、いずれも20 cmである。各測点間の距離は、斜面の上方から順に4.4, 5.0, 4.7 mで、それぞれ測線a, b, cと名づける。

積雪表面に起状はなく、下方にゆくにつれて傾斜は急になっていた。3つの測線のうち、中央のbは毎回の観測で縮みが観測された。観測終了後、地面の起状を調べたところ、測線bの下方の地面傾斜は16°で、前後の傾斜よりゆるくなっていた。この前後の傾斜は、それぞれ21°と29°であった。この範囲は尾根に近いところで、引張領域と考えられるが、地形の影響で圧縮された部分も出てきたのである。

この実験斜面は、普通の山の斜面にくらべて、極めて起状の少ない平坦な斜面であるが、それでもわずかな凹凸のために引張領域と考えられるところでも、雪の圧縮が起っている。斜面の雪を引張り、中立、圧縮の3領域に分ける考え方は、幾何学的な理想斜面についての分け方で、実際の斜面については、そのままでは成立しないことを示している。

No. 8 (鋼巻尺による測定)

No. 8の測定はNo. 9の読取顕微鏡による測定と同じ断面で行なわれ、約8日間継続された。そのうち2日あまりが読取顕微鏡による測定とかなっている。深さの異なる3本の測線について歪を測定したが、測線は地面に近い方から上の方に順に、a, b, cと名付ける。累積歪量 $\Sigma \epsilon$ 、歪速度 $\dot{\epsilon}$ 、気温 T_a の時間的変化を第7図に示した。a, b, c各測線の累積歪量 $\Sigma \epsilon_a$, $\Sigma \epsilon_b$, $\Sigma \epsilon_c$ は時間とともに増加するが、増加速度すなわち歪速度 $\dot{\epsilon}_a$, $\dot{\epsilon}_b$, $\dot{\epsilon}_c$ は次第に小さくなった。上層になる程累積歪量 $\Sigma \epsilon$ 、歪速度 $\dot{\epsilon}$ は大きくなっている。No. 3の場合には第5図に示したように、気温の極大に対応して、歪速度にも極大が見られたが、今の場合には、極大はあらわれない。これは測定の時間の間隔が長かったため、歪の変動が平均化されたからであろう。



第7図 累積歪量 $\Sigma \epsilon$, 歪速度 $\dot{\epsilon}$ と気温 T_a の時間的变化

右端に No. 9 の読取顕微鏡で測定した測点の位置を示した。左端の矢印は巻尺と読取顕微鏡による歪の測定がかさなった時間、 $\dot{\epsilon}(3,4)$, $\dot{\epsilon}(2,5)$ は読取顕微鏡の測定から得られた測点3と4、測点2と5の距離の伸びの歪速度

No. 9, 10 (読取顕微鏡による測定)

No. 9 の測定は上に述べた No. 8 の測定と同じ断面で行なわれた。測点の位置は第7図の右端に示したように、測線 c の中央部で、測線の上に3と4、測線の下に2と5をえらび、3と4、2と5の測点間の距離の歪を調べた。これら2組の測点のはじめの距離はほぼ10 cm で、3と4、2と5を結んだ線は、表面の傾斜にほぼ等しい。

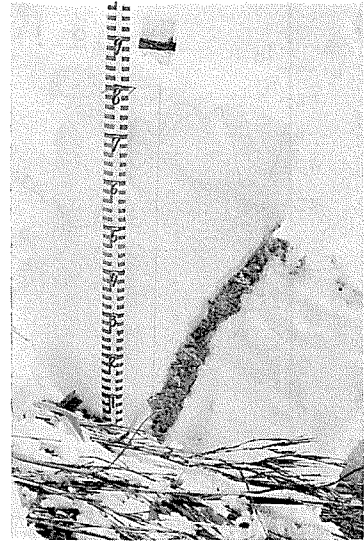
第2表に示したように、歪速度の全期間の平均は、それぞれ2.2, $2.5 \times 10^{-3}/\text{day}$ とほぼ等しいが、測点3と4の間では歪速度は-6.0から19.8の間に又、測点2と5の間では歪速度は-1.7から24.7と大きく変動し、しかも負の値もある。全期間では伸びているが、途中の短い期間では縮んだこともあったわけである。

第7図の左側、 $t=0$ から20時間までの間はNo. 8の巻尺による歪の測定と顕微鏡によるNo. 9の測定が同時に行なわれた時間で、図には矢印でその期間を示し、歪速度の値も書き入れておいた。No. 8の測線cの2.8 m という長い測線で測った歪速度 $\dot{\epsilon}_c$ はこの期間で $1.8 \times 10^{-3}/\text{day}$ で、No. 9の10 cm という短い測線で測った歪は、測点3と4の間の歪速度で、 $-0.2 \times 10^{-3}/\text{day}$ 、2と5の測点間で $2.4 \times 10^{-3}/\text{day}$ となって、同じ層内においても、かなり異なった値を示している。

No. 10 はほぼ同じ位置で1カ月あとの3月下旬に行なった測定で、これも全体としては伸びているが、時には縮むこともあった。

3) 底面すべりについて

1月27日、南斜面の尾根から、斜面ぞいに14m (A点)、20m (B点) 下ったところの積雪に、鉛直な穴をあけ、穴の底に基準点としての木杭を打ち込み、その上にオガクズを入れておいた。はっきりした日時は不明であるが、3月中旬にこの付近で底なだれが発生し、B点の20mあまり下方から全層が落下した。オガクズを入れてから2カ月後の3月28日に断面をつくり、基準点とオガクズのずれを測定した。A点では6cm、B点では22cm、積雪は斜面にそってすべっていた。第8図にB点の状況を示した。これをすべり速度になおすとA、B点でそれぞれ、1.0、3.7 mm/day となる。AB間もとの距離と両点のすべりの量の差から、平均の歪速度を求めると、 $0.45 \times 10^{-3}/\text{day}$ となる。底面でのすべり速度を第1表に、歪速度を第2表に、測定番号 No. 11 としてのせておいた。



第8図 底面すべり

物差しの左側に基準点の木杭、
右側にオガクズの柱がある

IV. ま と め

積雪内部に測点として目印になる物体を挿入しておく。この物体が軽くて、あまり大きくなければ、そのために雪の動きを乱すことはない。この測点の動きを追跡することにより、自然状態における積雪の中のいろいろな深さにおける、変位や雪の歪を知ることができる。測点として使用された物体は、密度約 0.05 g/cm^3 、1 cm 角で長さ7~8 cmの棒状に切った発泡樹脂である。

観測された変位、歪、底面すべりについてその特徴を要約する。

1. 変位速度、歪速度とも、気温の変化に応じた日変化がある。
2. 地面の傾斜 30° 前後、積雪深1m、表層がこしまり雪の場合、表面の雪の変位速度はほぼ 10 mm/day である (No. 1, 2)。

雪が圧密され、しまり雪になると変位速度は小さくなり、こしまり雪の半分あまりになる。

3. 読取顕微鏡により微視的にみると、変位速度、歪速度とも数十分の単位で変動がみられる。

4. 歪の測定において、測線距離の長短により歪の値が異なる。極端な場合には、長い測線 (2.8 m) において伸びが進行していたが、同じ層において、短い測線 (10 cm) では縮みとなってあらわれることもある。したがって斜面上の積雪を巨視的に眺めたときにはのびでも、それをこまかく微視的にみると、所によって縮むこともあり、雪は一樣な運動をしているわけではない。

5. 斜面上部の引張領域においても、地面の小さな起伏や樹木などの影響で、部分的には圧縮の進行しているところもある。

Королев⁵⁾ は 0.001 mm の精度のダイヤルゲージで斜面積雪のクリープを観測している。

彼の結果もクリープは一様な速さで進行するのではなく、間欠的に早くなったり遅くなったりすることを報告している。

第1表、第2表の測定番号 No. 1 から No. 9 までは、なだれの危険のない時期の測定、No. 10 はなだれが落下したあと、斜面上部に残っている積雪についての測定である。したがってこれらは、一応斜面積雪の安定状態のものと考えられる。No. 11 の底面すべりの値は、なだれの恐れのない時に設置し、なだれが発生したあと、落下せずに斜面上に残っている雪が安定し、再びなだれの発生する危険がなくなってから測定したものである。その間には、不安定状態も経過してきたわけであるから、安定時と不安定時のすべりの累積したものを測ったことになる。

Gand⁶⁾ 等のスイスでの観測によると、真冬の1月から2月にかけて、底面すべりはほとんどなく、2月中旬頃から底面すべりが始まることを報告している。このことから、我々が底面すべりを観測した場所において、積雪に割れ目の発生した時には、底面すべり速度はかなり大きかったものと考えられる。

終りに、この研究に関して御指導いただいた、藤岡敏夫教授、御協力下さった北大天塩地方演習林の方々に感謝いたします。

この研究の費用は文部省雪崩特別事業費から支出された。

文 献

- 1) Haefeli, R. 1939 Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Beiträge zur Geologie der Schweiz Geotechnische Serie Hydropologie, Lieferung, 3, 1-63.
- 2) 桜井俊輔 1941 傾斜面に積った積雪層の移動測定 (特に匍匐と沈降). 雪氷, 3, 429.
- 3) 清水 弘 1968 斜面積雪の内部歪 I. 低温科学, 物理篇, 26, 143-168.
- 4) 藤岡敏夫・秋田谷英次・成田英器・川田邦夫 1971 斜面積雪の挙動の研究 I. (歪, 歪速度). 低温科学, 物理篇, 29, 125-134.
- 5) Королев. А. И. 1965. Медленное сползание снежного покрова на склоне. Труды первого всесоюзного совещания по лавинам. Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 172-185.
- 6) in der Gand, H. and M. Zppanicic 1966 Snow gliding and avalanches. IUGG, Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Publ. 69, 230-242.

Summary

The field observations of displacement, strain and glide of snow cover on the slope were carried out at the Avalanche Reserch Station, Toikanbetsu, northern Hokkaido.

A snow pit was made and targets were inserted on its vertical wall which was cut perpendicularly to the contour line of the slope. Small columns of porous polystyrol were used as targets (1×1×7 cm). Targets inserted on the snow wall move with snow cover to the direction of downhill and displacements of targets were measured every several hours. Two kinds of apparatus were used to measure displacements. One is a micrometer which is used for stereo-photogrammetry (the minimum scale 0.05 mm)

and the other is a traveling microscope (the minimum scale 0.01 mm) as shown in Fig. 1 and Fig. 2.

A micrometer was fixed tightly parallel to the slope on a wooden stand. In Fig. 1 b, P_1 is the initial position of a target and after certain hours it moves to P_2 by snow creep and glide motion. $\overrightarrow{P_1P_2}$ is a vector of displacement of snow cover. We can get the component d in the direction of the slope line by turning a screw A of the apparatus. The coordinates of targets and vectors of displacement are got with the traveling microscope.

In Table 1, snow depth, positions of targets and their velocity of displacement of each observation are shown. Nos. 1, 2 and 6 are measured with the micrometers and Nos. 9, 10 with the traveling microscope. Fig. 3 shows the relation between the velocity of displacement (V_d) of targets A, B and the air temperature (T_a) of No. 2 in the table 1. Σd is the total amount of displacement. Target A is set 1.4 m upward and B is set 0.5 m downward along the slope from a fence for the avalanche control which is situated 40 m downward from the ridge.

In Fig. 4, the result of displacements of No. 9 measured with the traveling microscope is shown. P and V are components of the vector of displacement R , and \dot{P} , \dot{V} and \dot{R} are the mean velocities of four targets (2, 3, 4 and 5), respectively. $\dot{P}_2 \sim \dot{P}_5$ represent the mean velocities of displacement of individual targets to the direction of slope within the entire period.

Strain and strain rate are also measured on the wall of the snow pit by the following two methods:

1) Two targets separated 3~5 m from each other are inserted in the same snow layer of the vertical wall. The span between the two targets is parallel to the maximum slope line and the length of the span was measured with a steel tape pulled from both side under the constant tension.

2) With the traveling microscope the strain of a short span (10 cm) was measured also.

In Table 2, the results of strain are shown and observation of No. 2'~No. 8 are measured with a steel tape and those of Nos. 9, 10 are measured with the traveling microscope.

In Fig. 5, total strain $\Sigma \varepsilon$, strain rate $\dot{\varepsilon}$ and temperature T_a are shown of No. 3 in Table 2; a, b and c mean the spans at lower, middle and upper layers of the snow cover, respectively.

Fig. 6 shows the slope profile, displacement and strain of No. 6 in Table 2. A, B, C and D show targets for displacement; a, b and c show the spans for strain. The velocity of displacement V_d and total value of displacement Σd are shown above the snow surface and mean strain rate ($\dot{\varepsilon}$) and elongation (Δl) of spans in the entire period of observation are shown below the ground in Fig. 6. At span c the distance shortens by 5 mm and total value of displacement of target D is about 5 mm smaller than c. Near the target D several trees stood and leaves or stems of dwarf bamboos were mingled with snow cover, while at the upper part of the slope dwarf bamboos fell under snow cover. This caused compression to take place between targets C and D to the direction of the slope in snow cover.

In Fig. 7 the strain rate on the long span (2.8 m) and short span (0.1 m) are compared. As shown on the right-hand side of Fig. 7, at the middle part of span c the strains of the short spans (2·5, 3·4) were measured with the traveling microscope. These two kinds of measurements described above were simultaneous as long as 20 hours from the start of observation; numerical values of strain rate ($\dot{\epsilon}_{(3\cdot4)}$, $\dot{\epsilon}_{(2\cdot5)}$) on the short spans are shown on left-hand side of Fig. 7.

The distance of glide at the bottom of snow cover was observed in measurements Nos. 11 a and b by means of the sawdust column method, and its results are shown on Table 1 and 2. This distance was 6 cm at point A and 23 cm at point B within 2 months and their gliding velocities were 1.0 and 3.7 mm/day, respectively. The average strain rate between A and B is accordingly 0.5×10^{-3} /day.

According to the results of these field investigations, we can get the following results:

- 1) The velocity of displacement and strain rate change in response to the air temperature, everyday.
- 2) In the case of a slope with angle 30° and snow depth 1 m, the velocity of displacement of newly fallen snow is about 10 mm/day on surface layer.
- 3) Velocity of displacement and strain rate decrease according to the densification and settlement of snow cover.
- 4) At the tension zone on the slope, compression occurs under the influence of vegetation and the irregularity of the terrain.
- 5) Even along the same snow layer, strain rate is not uniform, varying from point to point.
- 6) The distance of glide of the entire snow cover along the ground is not negligible compared with the internal snow creep.