



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スキーの研究 (3)
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio
Citation	低温科学. 物理篇, 16, 31-46
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17927
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p31-46.pdf



ス キ ー の 研 究 (3)*

藤 岡 敏 夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 32 年 7 月受理)

I. ま え が き

筆者はさきに簡単な自記装置をスキーにとりつけ、スキーが滑走中、足でスキーをおしすすめている力を連続的に記録した¹⁾。この力はスキーが雪からうける抵抗にほぼひとしいものである。しかし、これらの実験には札幌市近郊のスキー場がつかわれたので、すでに多くのスキーヤーによつてふみかためられた雪についておこなわれたものであつた。本年 2 月下旬、筆者の属する研究室は、北海道雨竜郡幌加内村^{モシリ}母子里にある北大演習林で積雪の物理学的性質の研究をおこなつた。その折、さきに使用した装置に改良をくわえたものを携えてゆき、まだいぢども踏まれたことのない新雪について実験をおここのうことができた。この論文はその実験結果の報告である。さきに報告した筆者のスキーの研究 (1)、吉田の報告したスキーの研究 (2) をこの論文では単にそれぞれ報告 (1)、(2) とよぶことにする。

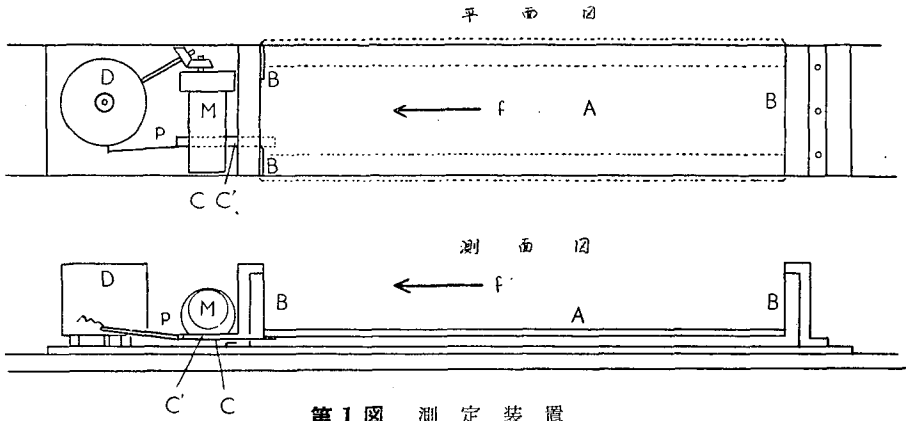
II. 測 定 装 置

図板 I の写真 (1) が今回スキーにとりつけて使用した測定装置である。手前の装置は記録部分の内部がみえるようにおおいを外してある。実験の時には向う側の装置のようにおおいをかける。おおいの一部は簡単にとり外すことができ、記録用紙をまいたドラムがとりだせるようになつている。

第 1 図はこの測定装置の略図である。いくつかの点で改良されてはいるが、以前の装置の基本的な特徴、すなわち、スキーを前におしすすめる力 f が、摩擦部分をひとつももたないいくつかのスプリングの変形だけでつたえられ、記録される点にはかわりがない。靴をのせる板 A に力 f が矢印の向にくわえられると、ペン p は円弧をえがいて上にあがる。 p の先に鉛筆の芯をつけておくと、ドラム D にまいた紙の上には、力 f に比例した円弧がしるされる。

靴をのせる板 A は、前後を板バネ B で宙づりにされている。 C, C' もやはり幅のせまい板バネで、板 A とペン p との間にあつて、 A の水平方向のうごきを p の円弧のうごきにかえる仕掛である。 C, C' の左の端はペン p の根元を上下にはさんでハンダ付され、 C の右の端は A に、 C' の右の端は A を吊つている柱に固定されている。 A が矢印の向に力 f をうけて

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 369 号



うごく、バネ C も矢印の方へうごこうとするが C' はその右端が固定されているため C, C' の先端は上におしあげられる。したがって、ペン p は円弧をえがいて上にあがるわけである。以前の装置では C, C' の2枚の板バネと板 A との間に馬蹄形をしたスプリングが入れてあつて、 A のうごきを一度このスプリングの変形に直したのであつた。今回はこのスプリングをとり除き、そのかわりに A を吊つているスプリングを強くした。仕掛が簡単になつただけ故障も少なくなり、装置全体が小型になつた。

記録用のドラム D を駆動する動力には、日本マイクロモーター会社製のモーター $CL-2A2-30$ をつかつた。第1図に M とかいてあるのがこのモーターである。減速用のギヤ装置が直結されたモーターで、正規の使用電圧は $7.5V$ 、回転数1分間30回転である。このモーターを単一乾電池4個、 $6V$ でうごかし、さらに歯車装置で回転をおとしてドラムをまわした。ドラムは5秒で1回転し、モーターの電流は $20mA$ 以下である。玩具の自動車などにとりつける小型のモーターが市販されている。筆者も一時このモーターを使用したこともあるが、あまりにきやしやにできているため、長期の使用にたえることができなかつた。

乾電池は幅のひろい革のバンドにとりつけ、スキーヤーの下腹にまきつけた。革バンドがアノラックの内側にはいるようにして、低温による乾電池の電圧低下をふせいだ。気温が $-20^{\circ}C$ 近くの日を使用したこともあるが、この程度の注意で障害はあらわれなかつた。スイッチは2本のストックの頭にとりつけ、スキーヤーが通りながらモーターの始動、停止をおこるようにした。

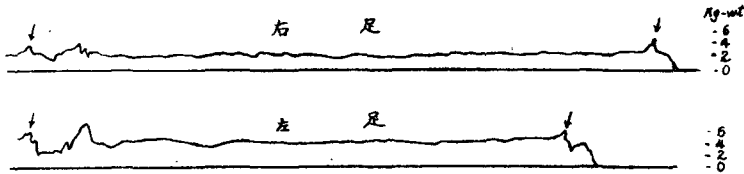
靴をのせる板 A は厚さ $4mm$ のジュラルミンの板で作つた。人が板 A についた時、この板がたわむと、それにつれて板バネ C, C' もたわみペンがうごく。板のたわみをふせぐために $4mm$ の厚さにしたのであるが、この程度でもペンのフレをとめることができなかつた。そこで板 A の両側に $2cm$ 幅の鉄のアンクルをとりつけて補強した。第1図の平面図に点線でしめしてある部分がこのアンクルである。板 A とスキーの台との間には約 $5mm$ の隙間があるが、この隙間に雪がはいらないように、板とスキーとの間にナイロンの布をはつた。板 A に

はバックン、ビンディングがとりつけられ、前傾バンドも使用できるようになっている。

実験に使つたスキ－はイタヤ材の単板スキ－である。長さは、先端から裏面にそつて後端迄で212 cm, スキ－の幅は頭部の付け根で8.6 cm, 靴ののるところで6.8 cm, 後端から3 cmのところでは7.8 cmである。測定装置をつけたスキ－の目方は、左右のスキ－ともおのおの4.3 kgであつた。普通のスキ－の倍近い目方になっているが、補強用につけた鉄のアングルの目方が重いことが大きい原因である。スキ－を平板上においた時、平板とスキ－の裏面との隙間は、靴ののるところで最も大きく2.7 cmであつた。スキ－の裏にはラッカーを2回塗つておき、実験の必要に応じてワックスやパラフィンを手でぬりつけた。ラッカーは実験のおわるまではげおちることはなかつた。

III. 測定結果

実験は高さ約5 mの岡の北斜面でおこなわれた。一様な傾斜をもつた斜面で、斜面の長さは50 mあまり、角度は 12° であつた。雪質は雪面から約7 cmまでが新雪で、それから下に行くにしたがつて連続的にしまり雪にかわり、ほぼ2 mで地面に達する。スキ－は岡の上から最大傾斜の方向にまっすぐ下り、ストックの頭につけてあるスイッチをおして、途中に設けてある区間の記録をとる。



第2図 記録の1例。両端の矢印の間25 m, $\bar{v} = 4.9$ m/sec.

第2図はこのようにしてえられたスキ－の抵抗の記録の一例である。時間は左から右にすすむ。左右の足の記録をくらべる時の便宜のために、斜面の途中2カ所に雪で階段をもうけた。記録の両端に矢印でしめた2つの山は、スキ－がこの階段をとる時にあらわれたものである。2つの階段の距離は20 m内至25 mにとつた。第2図のものは25 mである。また、この階段の傍に人がいて、秒時計でこの区間をスキ－ヤーが通過する時間をはかり、平均速度 \bar{v} をもとめた。岡の上から最初の階段までの距離約10 mは助走距離としてつかつた。

第2図にみられるように、えられた抵抗力の記録は極めて変動のすくない記録である。ここにかかげた例にかぎらず、新雪についてえられた記録はすべてこのような記録であつた。スキ－でふみかためられた雪についてえられた、報告(1)のはげしい変動をともなつた記録にくらべるといぢるしく単純である。記録の平均値は左右のスキ－でひとしくないが、これはスキ－ヤーの体重が両方のスキ－に平均にかかつていないことからおこることである。

以上のようにしてえられたいろいろな測定結果を第1表にまとめてあらわした。表の中で傾斜は斜面の傾斜角、温度の項のうち T_a は気温、 T_{s0} は積雪の表面温度、 T_{s10} は表面より

第 1 表

傾斜 (度)	温 度 (°C)			\bar{v} (m/sec)	\bar{f}_r (kg-wt)	\bar{f}_l (kg-wt)	\bar{f} (kg-wt)	μ_k	記 事
	T_a	T_{s0}	T_{s10}						
12	-7.8	-6.4	-7.3	5.3	2.5	—	—	—	吹雪, 硬度* -2.0
"	-7.8	-6.7	-7.3	—	2.6	—	—	—	" "
"	-7.3	-5.1	-7.0	5.2	3.9	—	—	—	" "
"	-3.6	-5.0	-8.2	5.3	2.6	5.6	8.2	0.117	晴, 微風, 硬度 -1.8
"	-4.3	-8.8	-5.1	5.3	2.4	4.3	6.7	0.096	" " "
"	-5.0	-8.8	-5.2	5.2	2.4	4.8	7.2	0.103	" " "
"	-5.9	-10.6	-5.5	5.7	2.2	5.8	8.0	0.104	" " "
"	-5.5	-10.2	-5.5	4.7	2.7	3.8	6.5	0.093	" " "
"	-5.0	-9.8	-5.4	5.7	3.1	3.3	6.4	0.092	" " "
"	-5.4	-10.7	-5.7	5.8	2.7	4.8	7.5	0.107	" " "
"	-6.4	-10.8	-5.9	5.4	—	4.8	—	—	" " "
"	-7.3	-12.0	-6.0	5.6	4.0	3.8	7.8	0.110	" " "
"	-7.7	-13.8	-6.6	4.6	3.2	3.4	6.6	0.094	" " "
"	-7.7	-13.8	-6.6	5.1	2.3	4.3	6.6	0.094	" " "
"	-7.2	-13.1	-6.9	4.8	5.7	0	5.7	0.082	" " 左足をうかす
"	-8.2	-14.8	-6.8	4.2	5.8	0	5.8	0.083	" " "
"	-9.7	-15.8	-7.4	4.5	2.3	4.9	7.2	0.103	" " "
"	-10.4	-18.0	-7.1	4.4	2.8	4.5	7.3	0.104	" " パラフィン 60°
"	-6.0	-5.4	-6.5	4.6	2.6	5.7	6.3	0.093	吹雪, 風向右真横, 硬度 -4.5
"	-6.4	-5.9	-6.8	4.4	4.4	6.1	10.5	0.150	" " "
"	-6.8	-6.5	-7.1	4.7	2.6	5.2	7.8	0.111	" " "
"	-7.2	-7.1	-7.8	4.5	3.1	4.7	7.8	0.111	" " "
"	-7.3	-7.0	-8.1	4.3	3.1	4.7	7.8	0.111	" " "
"	-7.8	-7.8	-8.1	3.8	2.8	5.8	8.6	0.123	" " "
"	-8.0	-8.8	-8.6	4.7	1.8	5.2	7.0	0.100	" " "
"	-9.0	-11.4	-8.7	4.9	1.8	4.8	6.6	0.094	" " "
"	-9.4	-12.6	-8.8	4.1	1.8	5.8	7.6	0.108	" " "
14	—	—	—	6.3	3.0	4.4	7.4	0.106	吹雪, 風向右真横
"	-6.2	-4.8	-4.2	6.3	2.5	—	—	—	" "
"	-6.8	-6.8	-4.7	6.3	2.8	4.4	7.2	0.103	" "
"	-7.1	-8.4	-4.9	6.5	2.8	4.3	7.1	0.101	" "
"	-7.4	-8.8	-5.0	6.5	2.8	4.3	7.1	0.101	曇 "
"	-7.4	-9.2	-5.2	6.9	2.8	4.3	7.1	0.101	" "
"	-7.2	-8.8	-5.5	6.7	2.8	4.9	7.7	0.110	" "
"	-7.2	-8.6	-5.8	6.5	2.3	4.6	6.9	0.099	吹雪 "
"	-7.3	-8.0	-5.8	6.5	2.8	3.7	6.5	0.093	" "
"	—	—	—	6.5	1.8	4.9	6.7	0.095	" "

* 黒田式円錐硬度計による雪の硬度。

10 cm 下の雪温である。表面温度 T_{s0} は細いアルコール寒暖計を雪面より 2~3 mm 下のところに置いて測定した。 \bar{v} は平均速度、 \bar{f}_r 、 \bar{f}_l は右足および左足の抵抗の平均値、 \bar{f} はこの 2 つを加え合せたものである。 μ_k は運動摩擦係数で $\bar{f}/(M+m)g \cos \theta$ である。 M 、 m はそれぞれスキ－ヤーおよびスキ－の質量、 g は重力加速度、 θ は斜面の傾斜角をあらわす。その他のことについては、表の記事の項にかきこんだ説明をみていただきたい。

IV. シュプールの断面の観察

第 1 表にみられるように、気温 T_a は -5°C 以下で、表面の新雪も乾いた粉雪であつた。スキ－でこつた後には、粉雪で軽くおうわれたシュプールのこさされるが、このシュプールをつぎのようにしてしらべた。まず、シュプールを横切つて穴をほり、シュプールを横断する鉛直な雪の断面を作る。断面の壁は真白であるが、この壁にインクをうすめた液をキリ吹きでかけ、トーチランプであぶると、図版 I の写真 (2a) にみられる模様があらわれる。左側が右足、右側が左足のシュプールの断面である。この写真で右足の方が左足の方より深いのは、スキ－ヤーの体重が右足の方に余計にかけられたためである。このようには時には、抵抗の記録も右足の抵抗の方が左足の方より大きくなる。

写真 (2a) の右足のシュプールの断面は 2 つの部分からなつている。黒くうつつて A とかきいれてある部分と、その上にあるもやもやした部分 B であつて、2 つの部分の境い目 C は、はつきりした線になつている。この境い目 C のところをスキ－の滑走面が通つたのであつて、A の部分はスキ－によつて圧縮をうけた雪、B の部分はスキ－が通りすぎてからまわりから流れこんだ雪である。中谷²⁾にしたがつて、A の部分を“圧縮層”、B の部分を“かくはん層”とよぶことにする。シュプールの断面を焰であぶる方法や、後にのべるベンガラで着色した面をあらかじめ雪面に垂直に置いておいて、スキ－でこり、ベンガラの移動から雪の流れをみる方法も中谷の考案したもので、スキ－の研究には欠くことのできないすぐれた方法である。

写真 (2a) で、スキ－で乱されていない雪のなかには水平にはしる黒い縞がみえる。縞の 1 本の線は、実はうすい雪の層であつて、白くうつつている部分よりも水をふくみやすい性質をもっていることは中谷がすでに指摘している。キリ吹きでかけられたインクは全面一様に散布されるのであるが、焰で表面の雪がとけて、うすい水の膜ができると、水をふくみやすい層にインクが吸いこまれ、写真のような縞になるのである。このような縞は (2a) の圧縮層の内部にもあらわれている。

(2a) の写真は、シュプールに直角な鉛直面で雪を切つた断面であるが、シュプールの中心線をふくむ鉛直面で切ると図版 I の (2b)、(2c) の断面がえられる。(2b) は (2a) の右足、(2c) は左足である。(2a) にあらわれている圧縮層 A、かくはん層 B、滑走面 C をおなじ符号であらわしてある。(2b)、(2c) には (2a) ではあまりはつきりしなかつた圧縮層の下の線がよくあらわれている。この線を D 線と名付ける。(2a) でみた圧縮層内の横縞は (2b)、(2c) の圧縮層のなかにもあらわれている。

スキーを止らせる前に、スキーの進行方向に直角に鉄板で積雪に垂直に切れ目を入れ、それにベンガラを流しこんで着色面をつくっておく。着色面は雪とともに動くので、圧縮層が形成される時の雪の動きをみることができる。写真(2b)、(2c)の上端の曲つた線 *E* がこの着色面の切口である。(着色面の切口を着色線とよぶことにする)。(2b)、(2c)の着色線の形は圧縮層のなかでなめらかに弯曲している。滑走面 *C* の上にもベンガラの色がついていて、斜面の下手約4mへだたつたところ迄も流されていた。

写真(2a)や(2b)、(2c)の圧縮層に横縞があらわれていることはさきののべたが、このように、もともと積雪の中にあつて縞が圧縮層のなかでも保存されていることは、積雪がスキーの下になつた時に、雪の中で上下のかくはんがおこなわれず、そのままおしつぶされたことをしめしている。このことは、ベンガラの着色線が圧縮層のなかで、幅の広い線にボケてしまわないで、もとのままの幅の1本の線の形を保っていることからもしられることである。中谷は圧縮層のなかに保存されている縞と、着色線のなめらかに弯曲した形から、積雪は粘性流体に似た変形をするとのべている。圧縮層や着色線の弯曲がどのようにして形成されるかは以下の節でのべる。

V. 圧縮層の出来方の観察

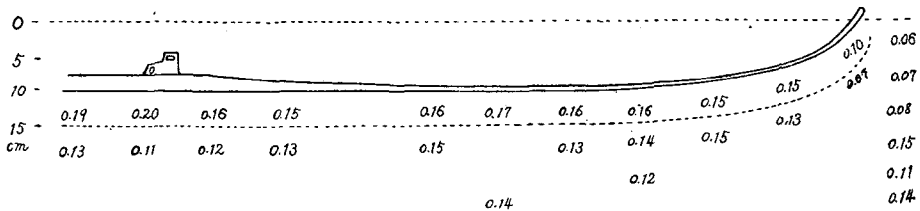
スキーの下にあらわれる圧縮層がどのようにして形成されるかをしらべるために、つぎの実験をおこなつた。平坦な雪面の上にスキーをならべ、スキーを足に結びつけず、ただ、つかけて人がのる。他の1人がスキーの前方2m位の所にたち、ストック2本をつないで一端をスキーにのつた人にもたせる。スキーの前に立つた人は、このストックを引つぱつてスキーを1m半位すべらせる。スキーにのつた人はストックを両脇につき、これをたよりに身体をうかせて静かにスキーから下りる。図版IIの写真(3)はこうして作られたジュプールの断面である。圧縮層 *A* は、ほとんどおなじ厚さをもつたまま、先端の弯曲部もふくめたスキーの全長にわたつて形成されていた。

写真(3)の圧縮層やまわりの雪には写真(2a)、(2b)、(2c)でみたとおなじ横縞がみえる。積雪のなかにある縞が圧縮層に入つてゆく様子を1本の縞について追跡するとつぎのようになる。この縞は圧縮層の境い目ではつきりした折れ目をつけて折れ曲り圧縮層に入る。圧縮層にはいつてからは大体スキーの頭部の形通りに曲つている。縞とスキーの滑走面との距離は、圧縮層に入つた境い目から頭部の付け根にいたる間に次第にせまくなり、それ以後は一定の間隔をたもつ。縞と縞との間隔もおなじように変化している。スキーの先端から頭部の付け根までの圧縮層には、自然積雪のなかに見える縞がつぎつぎにはいつてゆく。したがつて、積雪の圧縮はスキーの頭部のこの区間だけでおこなわれているわけである。

縞が圧縮層にはいると境い目で折れ曲るとのべたが、写真をよくみるとこの境い目にはさきに名付けた *D* 線はない。縞と縞との間に白くうつつている雪の層は、この境い目でもやはり白いのである。しかし、縞の折れ目が沢山あるために、あたかも *D* 線があるかのようにみ

える。縞の折れ目では積雪の破壊がおこなわれていると考えられるのであるが、もともと白くうつっている水を吸いにくい層は、破壊されてもやはり水を吸わないのである。またこの水に対する性質が破壊によつてもかわらないからこそ写真(2a)や(2b)、(2c)の圧縮層のなかに横縞が保存されたことにもなる。

写真(2)にはベンガラ線Eが2本はいつている。スキーの頭部の付け根にあるものは、圧縮層の境界面で2つの直線に折れている。これに反して、スキーの中央部の着色線は圧縮層のなかでなめらかに弯曲している。はじめの着色線の折れ目がD線のすこし下になつているけれども、この折れ目の所が本当の圧縮層の境目である。さきほどおなじように、この部分の雪がインクを吸わない性質の層にあたつているのでD線があらわれなかつたのである。前節でのべた写真(2b)、(2c)の着色線はスキーがとおりました後のものであるが、その形と写真(3)の中央部の着色線の形とはおなじである。(3)の2つの着色線の形と、さきにのべた圧縮層のなかにある縞の間隔のつまり方から考えて、圧縮層の形成には2つの段階があることが予想される。第1の段階は、スキーの頭部による単純な破壊圧縮で、第2の段階はスキーの水平部による圧縮層の流動変形である。第1の段階については第VI節で、第2の段階については第VII節でもつとくわしくのべる。



第3図 スキーによる圧縮層の密度分布
数字は密度 (gr/cm³), 左端に雪面の深さをしめす。

写真(3)の向う側のスキーの下で測定された雪の密度分布を第3図にしめす。点線であらわしてある圧縮層の輪かくは、写真(3)に現われた雪の断面の着色模様寸法を測定して描いたものである。圧縮層の密度はスキーの先端の値 0.10 gr/cm³ から増大して、頭部の付け根で 0.16 になり、それ以後はましてない。このことは、さきにのべた積雪の破壊圧縮の大部分はスキーの頭部でおこるとゆうことと一致している。(圧縮層の密度の値のうち一番左の2つが特に大きいのは、他の原因によるものであつて、スキーの上の面にのついていた雪が強い日射をうけてとけ、その水がこのあたりの雪ににじみこんだためである。)

圧縮層の下の破壊をうけていない雪の密度に不揃いな値がみられる。これは図の一番右に書き入れた自然積雪の密度の値からもわかるように、深さ 15 cm から 18 cm にかけて、特に密度の大きい雪の層がはいつているため、スキーによる圧縮が圧縮層以外のところにもおよんでいるのではない。密度の測定につかつた採雪器は高さ 3 cm、幅と奥行が 5 cm の箱型のものである。密度の測定をする時には、断面にインクをかけ烙であぶつて圧縮層や積雪の層構造を

みえるようにしておくことが出来ないで、おなじ深さで採雪したつもりでも、実際には位置が上下して、鉛直方向の密度の変化の大きいところでは、密度が不揃いな値になるのである。

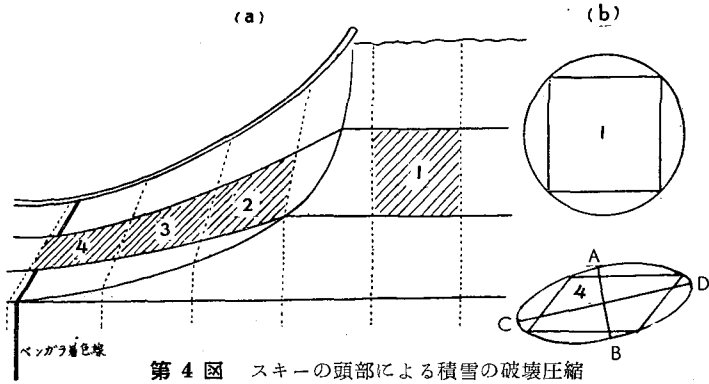
スキーの頭部の圧縮層については齋藤⁹⁾、針生¹⁰⁾の報告がある。この両氏の結果と写真(3)の圧縮とをくらべてみよう。

齋藤は中谷の報告した圧縮層の構造、ベンガラ着色線の形をもとにして、等間隔の水平線を数本雪の中に考え、これらの線がスキーの頭部でどのような形に曲げられるかを図に描いた。丁度写真(3)の横縞を頭で考えたわけである。しかし、齋藤の線はスキーの頭部圧縮層にはいる境い目でゆるやかに曲つていて、写真(3)のように、はつきりした折れ目にはなっていない。中谷はスキーが通過した後にはこされた圧縮層内のベンガラ着色線の形から、雪は粘性流体に似た変形をするのとべたのであるが、齋藤はこの考えをスキーの頭部にもあてはめた。しかし元来圧縮層内の雪は破壊圧縮された雪であつて、自然状態の雪とは異なつた雪である。圧縮層の輪かく線は、この2つの異なつた雪の不連続をしめす境界面の切口であつて、自然状態の雪の中にある横縞は圧縮層にはいる時、この境界線で角をつけて折れ曲るのである。齋藤の図のこの曲り目をつらねると圧縮層の輪かくがえられるが、この輪かくは大体写真(3)に似ている。写真(3)には直線に折れたベンガラの線がはいつているが、齋藤の図にも丁度この場所に線がいてある。しかし、その形はスキーの先端の方に弓なりに曲つた形である。したがつて、現実におこつている圧縮層の方が、齋藤が考えたものよりも単純な形になつているわけである。

針生は中谷と齋藤の報告をみて、スキーの頭部をふくめたスキーの全長にわたつて、ベンガラ着色線の形を実地にたしかめる試みをした。着色線はほぼ5 cm 毎に入れられたのであるが、ベンガラの代りにインクを使つた。ところが、積雪の中には水をふくみやすい層があることはさきにのべたが、インクがこれらの層に吸われるために着色線がひどくボケる結果になつてしまつた。しかし、写真(3)のベンガラの線の形を頭においてみれば、写真(3)の説明にのべたとおなじことが針生の実験でもおこつていることを知ることができる。なお、針生は熔であぶることをしていないので、横縞のことはわからない。

VI. スキーの頭部による雪の圧縮

進行するスキーによつて圧縮される雪は、写真(3)にみられるように、スキーの先端部からスキーの末端まで、ほぼおなじ厚さの層をなして、スキーの下面にそつて分布している。殊に著しいことは、ベンガラ着色線が圧縮層のなかで斜めの直線になつていることである。これは、スキー頭部による雪の破壊圧縮が圧縮層の全体にわたつて一様におこつていることをしめすものである。このスキー頭部による雪の圧縮の詳細な経過はわかつていないが、第4図の模式図にしめされているようにしておこるものと考えておそらく間違いはないであろう。第4図はスキーの中心線をふくむ鉛直断面図で、スキーの前方にある自然積雪のなかに描いた基盤目

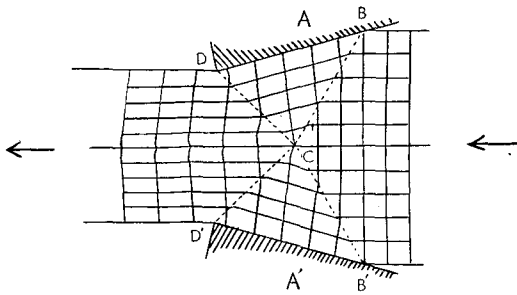


第4図 スキーの頭部による積雪の破壊圧縮

縞がスキーの頭部によつて変形されてゆく様子をしめしたものである。たとえば、第4図(a)に1と印された基盤目の1つである雪の要素は、破壊圧縮層の前縁に達すると、不連続的に大きな塑性変形をうけて2のような菱形にかわる。その後は3、4と変形の度合を連続的に増加する。この4の位置が写真(3)でベンガラ着色線のおつた所である。

齋藤、針生の両氏は、さきにものべた通り、このスキー頭部による雪の圧縮をしらべているが圧縮層の境界が明確なものであり、そこで雪が不連続的に大きな変形をうけることにはあまり注意を払っていない。しかし、このことは、このような雪の変形を理論的に扱う場合、たとえば、塑性変形理論によつて扱つたりする場合には、重要なことがらとして注意すべきもの

と思われる。第5図は金属の板をスリットAA'を通してさらにうすくする時におこる金属の変形の模様を塑性変形理論によつてもとめたものであるが(ヒル⁶⁾による)、金属板は直線BC, CB'に達したところで不連続的な塑性変形をうける。そのあと、第2の線DC, CD'に達するまではほとんど変形をうけずに移動し、この第2の線でふたたび不連続的な塑性変形をうけるわけである。スキーの頭部による雪の圧縮は、第



第5図 楔形ダイスによる金属板の引抜き (ヒルによる)

5図の中心線から上の半分にはほぼ対応するものとしてよいであろう。スキーの場合には、第2の不連続塑性変形の線DCが存在しないが、これはスキーの頭部の断面が第5図のスリットの断面のように直線ではなく湾曲していることと、また雪は非常に圧縮されやすく、金属のように変形によつても密度をかえないという性質をもたないことによるものと考えられる。第4図にしめしたように、同図(b)の正方形の雪の要素1に外接する円を考えると、この円は正方形が平行四辺形4に変形するとともに楕円になる。したがつて、結果的には、雪はこの楕円の短軸ABの方向に圧縮され、長軸CDの方向にはひきのばされたことになる。しかし、写真

(3)のベンガラ着色線の屈折の角度、また実際の雪の圧縮の度合をもとにして計算してみると、長軸方向には1割くらいしかのびていないのに、短軸方向には半分位にも圧縮されている。したがって、大ざっぱなところ、雪は短軸方向に単に圧縮されただけであると考えてもよいであろう。この圧縮変形の大部分は、上に説明したように、正方形1が圧縮層の境界に達した時に不連続的にこつたものである。その後も変形は第4図(a)の2, 3の段階をえて4に達するまでに連続的にすすむが、この変形においてもある方向における圧縮となつている。最初の不連続圧縮と、その後の連続的な圧縮の和が、第4図(b)にしめした圧縮になるわけである。この圧縮の過程のあいだに雪の要素ははじめの位置に対して廻転しているので、圧縮の方向は空間的にみれば各段階によつてひどく変つている。しかし、雪の実質に対する圧縮方向の変化は小さいはずである。したがって、大まかにみれば、雪は実質的には、ほぼおなじ方向に、第4図(b)のABの方向に、圧縮をうけながら1の状態から4の状態にうつつたと考えてもよい。

吉田・黒岩⁷⁾、木下⁸⁾の円筒形をした平底のおもりを雪の上におとす実験をした。おもりは雪にめりこんでとまるわけであるが、このおもりをとりさり、雪を鉛直面で切つて断面をインクと焰の方法で着色してみると、おもりの下には、おもりとおなじ直径をもつ円筒形の圧縮部があらわれた。この圧縮部には、もとの雪に存在していた水平の縞が、スキーの頭部で圧縮された雪と同様に、そのままおしつぶされて保存されている。このような事実と、スキー頭部による雪の圧縮は雪の実質に対してほぼ同一方向におこなわれているとゆうことから、スキー頭部による雪の圧縮は落下するおもりによる圧縮と同等のものであると考えてよいであろう。

木下はおもりを雪におとした時、おもりによつて作られた穴にはじめに存在していた雪の質量 M と、おもりが雪に与えたエネルギー W との関係をもとめている。断面積 A のおもりが D cm 雪にめりこんでとまつたとすれば、 $M=AD\rho$ (ρ は雪の密度) であるが、この M と W との間には比例関係がなりたち、密度 0.2 gr/cm^3 のしまり雪については $W/M=0.3\sim 1 \text{ kg-wt}\cdot\text{cm/gr}$ となつている。今この値を c としておく。スキーがうける抵抗を $f \text{ kg-wt}$ とすれば、スキーがある距離 l cm すすむ間に頭部は雪に対して $W=fl$ の仕事をする。この間に $M=l\cdot b\cdot h\cdot\rho$ (b はスキーの幅、 h は頭部の高さ) の雪が圧縮されてスキーの下におしこまれる。したがって $W/M=c$ の関係から、 $f=c\cdot b\cdot h\cdot\rho \text{ kg-wt}$ として、スキーの頭部のうける抵抗がきめられる。

写真(2a)にうつされているスキーの右足の滑走面の深さは雪面より11 cm である。雪質は7 cm の深さまでは 0.07 gr/cm^3 の粉雪で、その下深さ20 cm までは0.13の密度の様なしまり雪であつた。粉雪の層は軽くて飛ばされたり、わきののけられたりして、スキーの頭部には大きな抵抗をおよぼさないと考えられる。したがって、スキー頭部に対する抵抗は、粉雪の下にある密度0.13のしまり雪を $h=4 \text{ cm}$ だけ圧縮するために生ずるものであると考えてよいであろう。この h と ρ の値をつかい、スキーの幅 b を9 cm とすると、 f は $1.4\sim 4.7 \text{ kg-wt}$ となる。写真(2a)の右足の抵抗 f_r はほぼ 3 kg-wt であつて、いまもとめた f の値は f_r の半分乃至同程度になつている。

第 2 表

実験番号	1	2	3	4	5	
測定値	3.0	2.5	2.6	2.6	2.8	
計算値	$c = 0.3$	1.4	0.9	0.7	0.9	0.9
	$c = 1.0$	4.7	3.0	2.4	2.9	3.1

測定値, 計算値の単位は kg-wt.

積雪の成層状態が異なる場合についてえられたスキーの抵抗の測定値と, 上と同様にして計算でもとめた計算値とを第2表にあらわしてある。さきほどの c の値によつて計算の結果は異なつてくるので, 第2表には $c=0.3$ と $c=1.0$ の両方の結果をしめしておいた。計算によつてえられたスキー頭部の抵抗は, 実測されたスキーの全抵抗のほぼ $1/4$ 乃至同程度となつている。

頭部が f の抵抗をうけながら, 斜面を l cm 下りる間に, スキーヤーが失なう位置エネルギーは $Mgl \sin \theta$ (M はスキーヤーの質量, g は重力加速度, θ は斜面の傾斜角) である。写真(2a)では $\theta=12^\circ$ であつたから, $M=60$ kg とすると fl は $Mgl \sin \theta$ の $1/10 \sim 1/3$ になる。すなわち, スキーヤーが位置を低下させることによつてえるエネルギーのうち, この程度のエネルギーがスキーの頭部の圧雪につかわれるのである。

VII. スキーの水平部による圧縮層の流動変形

写真(3)の圧縮層にみえる2本のベンガラ着色線のうち, スキー頭部の付け根にあるものは圧縮層内で直線をなしている。一方スキーの中程にあるものは, なめらかに曲り, スキーが通りすぎた後の写真(2b), (2c)の着色線に似た形になつている。2本の着色線の間隔は60 cm 足らずであるが, スキーが60 cm 程すすむ間に圧縮層内にすべりが生じた結果であるとしなければならない。平面摩擦によるこのようなすべりをしらべるために, つぎにのべる実験をおこなつた。

鉛直軸のまわりに廻転する台の上に雪をのせ, この雪に輪の形をした金属板をおしつける。雪の廻転の中心と, 金属の輪の中心とは一致させておく。こうすると, 輪には端がないから金属の輪と雪との間には純粋な平面摩擦ははたらく筈である。(この実験につかつた装置は, 筆者と足田が橈の研究¹⁰⁾に使つた装置とおなじ種類のものである。)このようにしてえられた輪のシュプール, ベンガラ着色面の切口, また, シュプールの直角に切つた断面をインクで着色した状態を図版IIの写真(4a), (4b), (4c)にしめす。これらの写真にみられるように, スキーの頭部に相当する部分がなくても圧縮層はあらわれ, ベンガラ着色線は, スキーの場合によく似た, なめらかに弯曲した曲線になつている。

雪が軟かいと輪を雪におしついただけで、輪が雪にめりこんで圧縮層が形成される。しかし、この実験につかつた雪は、 0.21 gr/cm^3 の密度の硬い雪だつたので、輪の単位面積当りの圧力を 20 gr-wt/cm^2 にしてもめりこむことはなかつた。この圧力は、人がスキーにのつた時、スキーが雪におよぼす圧力にはほひとしい。

写真(4)のa, b, cの3枚の写真は、雪が5廻転した後のものであるが、おなじ雪についての1廻転、3廻転後の状態でもベンガラ着色線の形、また、着色線が曲つている層の厚さは5廻転後のものとおなじであつた。したがつて、着色線は雪が1廻転もまわらないうちに弯曲してしまい、その後は形をかえないわけである。1廻転で摩擦面は85 cm移動し、摩擦面の線速度は40 cm/secである。写真(3)の場合のスキーの速度は数 cm/sec、雪の密度は 0.16 gr/cm^3 で条件は異なるけれども、現象としてはおなじものがおこつていると考えてよいであろう。写真(3)のスキーの中央部の着色線はスキーの先端から75 cmうしろにあるが、うえの実験結果から考えて、着色線はスキーの中央部にきた時には、すでに十分に弯曲しており、その後は形をかえることはないものと思われる。すなわち、雪はまずスキーの頭部で破壊圧縮をうけてスキーの下に繰りこまれた後、さらに塑性的に流れるが、この流動変形はすぐに完了してしまつて、それ以後雪は変形をうけない。そして、スキーの下面の大部分は純粋な摩擦力をうけつつ圧縮変形された雪の上を滑ることになる。

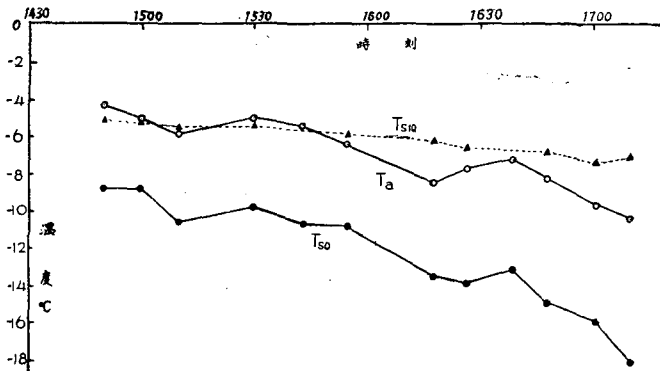
写真(4c)にしめされている鉄の輪のジュプールの下のインクで濃く着色されている部分の厚さは雪の回転とともにましてゆく。1廻転後に1 mm、3廻転以後は3 mmであつた。このインク着色部の上層1 mmではベンガラ着色線は弯曲しており、その下では弯曲していないのであるから、このインク着色部の上層1 mmと下層2 mmとはその成因がことなるはずである。この下層部分を便宜上濃縮層となづけることにしよう。すると濃縮層は、3廻転のあいだに、すなわち鉄の輪が2.5 m滑つたあいだに2 mmの厚さに発達したことになる。スキーの場合にも、着色線の弯曲のはじまる深さのところにも、濃縮層が発生するであろう。スキーの長さは約2 mであるから、上の結果から考えて、スキーの後端でも濃縮層の厚さは2 mm程度になるはずである。写真(2b), (2c)で、スキーの下の圧縮層の下面をしめすD線は、この濃縮層をあらわしているものと考えられる。

輪の実験の場合の濃縮層は、輪に荷重をかけて雪の上におしついただけでも、またこの状態で雪と一緒に廻転させても形成されない。荷重をかけたまま、輪に対して雪を廻転させた場合にはじめてあらわれるのである。したがつて、鉛直方向の圧力に加えて、摩擦による剪断力が作用することが、このような雪の濃縮層を発生させる原因であると考えなければならない。

輪の実験でえられた運動摩擦係数は0.1であつた。スキーの単位面積当りの垂直荷重は輪の場合と同程度であるから、この0.1の値をスキーの水平部の抵抗にあてはめると、スキーヤーの体重を60 kgとして、スキーの片方について、平均3 kg-wtの抵抗になる。第2表にスキーの頭部の抵抗の計算値がのせてあるが、その値は、水平部の抵抗の13乃至同程度である。

VIII. 抵抗と温度との関係

気温の低い時にスキーが通りにくいことは経験的に知られている¹¹⁾、実験的にもたしかめられている^{10), 12)}。しかし、スキーの抵抗が温度によつて変るとしても、それは雪の温度によつてかわるのであつて、気温それ自体が影響するわけではない。そして、第1表にしめされているように、気温と雪温とのあいだには大きな差があるのが普通であり、さらに、雪温は雪の表面からの深さによつてもことなる。



第6図 気温および雪温

T_a : 気温. T_{s0} : 雪の表面温度. T_{s10} : 雪面より 10 cm 下の雪温 (2月30日, 母子里)。

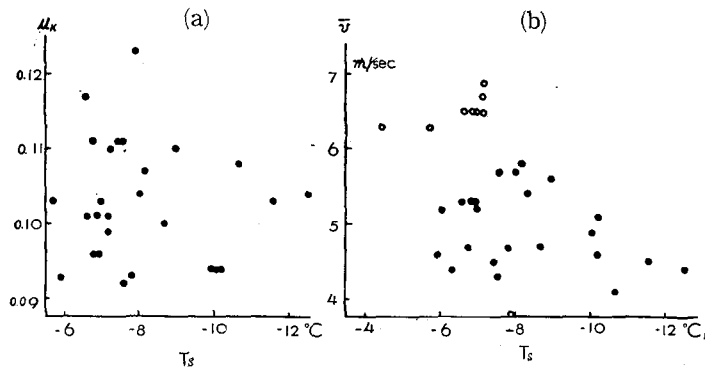
第6図はある晴れた風のほとんどない日の午後、実験場で測定された温度の推移をあらわしている。横軸は時刻、縦軸は温度をあらわす。白丸と実線でつらねたのは気温 T_a 、黒丸と実線でしめたのは積雪の表面温度 T_{s0} 、三角と点線は表面から 10 cm 下の雪温 T_{s10} である。表面温度は細いアルコール寒暖計を表面から 2~3 mm 下にさしこんではかつた。

雪の表面温度 T_{s0} は気温 T_a や深さ 10 cm での雪温 T_{s10} にくらべるといちじるしく低い。14時50分における T_{s0} と T_a との差は約 5° 、 T_{s10} との差は約 4° であるが、17時10分にはそれぞれ、 8° 、 11° に増加している。太陽が山にかくれたのは 17時頃なので、輻射で雪面がひどく冷却されたためである。このように、積雪の内部に大きな温度勾配が存在するとすれば、どの部分の雪の温度とスキーの抵抗とをくらべたらよいかが問題となつてくる。

現在スキーの抵抗と温度との関係を説明する説としてもつとも有力なものは Bowden¹³⁾ の説であろう。Bowden は、スキーの滑走面と雪との間に発生する摩擦熱によつて雪の一部がとかされて水になり、この水が潤滑剤として作用すると考えている。温度が低ければ、雪やスキーを 0°C 迄に暖めるための熱量、また、空中に逃げる熱量がますますから、水の出来る分量は少なくなり、スキーのうける抵抗はますますわけである。したがつて、この考え方からすれば、一番重要なのはスキーの滑走面と接触する雪の温度である。

圧縮層の密度分布をしめた第3図にみられる通り、圧縮層の密度は約 0.16 gr/cm^3 であ

り、自然積雪の表面から圧縮層の下面迄の平均密度は0.07である。したがって、圧縮層の雪は、はじめ、圧縮層の厚さ5 cmの $(0.16/0.07)=2.3$ 倍の厚さ11.5 cmをもつた雪の層だつたことになる。それで、圧縮層の下面の深さ15 cmからこの11.5 cmだけ上の位置、すなわち表面からの深さ3.5 cmにおける雪の温度が実際にスキーに接触する雪の温度を与えることになる。しかし、この3.5 cmの深さは少し浅くとりすぎている。なぜならば、自然状態の雪の密度は、第3図の右側にもみられるように、深くなるほど増大するにもかかわらず、圧縮層のはじめの厚さをもとめるために使つた乗数2.3は、自然積雪の平均密度をもとにしてもとめたもので値が大きすぎるからである。したがって、実際にスキーに接する雪の温度を、自然積雪の表面温度と10 cmの深さの温度との平均の温度としても、大たいのところは正しいであろう。この温度を T_s と名づける。



第7図 スキーの運動摩擦係数 μ_k 、平均速度 \bar{v} と雪温 T_s との関係
 T_s は雪の表面温度 T_{s0} と深さ10 cmにおける雪温 $T_{s,10}$ との平均値

第7図の(a), (b)は第1表の値を図によつてしめたもので、横軸はうえにのべた T_s である。(a)の縦軸には運動摩擦係数 μ_k を、(b)の縦軸にはスキー平均速度 \bar{v} をとつてある。ただし、(b)の場合、斜面の傾斜角 θ によるちがいがあらずために、 $\theta=12^\circ$ のものを黒丸、 $\theta=14^\circ$ のものを白丸であらわしてある。

第7図の(a)においても(b)においても、測定値はバラバラに散らばつて、ハッキリした温度の影響をみとめることができない。したがって、今回おこなわれたような、スキーが雪に深く沈む新雪の場合には、スキーの抵抗と温度とのあいだには簡単な関係はない。さきののべたBowdenその他の実験は、ふみかためられた固い雪についておこなわれたものである。

おわりに、この実験を御指導下さつた低温科学研究所の吉田順五教授、実験に参加してくれた同研究所応用物理学部門の研究員に感謝の意を表す。なお、この研究は文部省科学研究費によつておこなつたものである。

文 献

- 1) 藤岡敏夫 1954 スキーの研究 (1). 低温科学, 物理篇, **12**, 37.
- 2) 吉田順五 1954 スキーの研究 (2). 低温科学, 物理篇, **12**, 51.
- 3) Nakaya, U., Tada, M., Sekido, Y. and Takano, T. 1936 Physics of Skiing. Jour. Fac. Sci., Hokkaido Imp. Univ., Ser. II, **1**, 265.
- 4) Saito, R., 1949 Physics of Fallen Snow. 中央気象台, 歌文彙報, **19**, No. 1-2, 49.
- 5) 針生 巖 1949 スキーワックスの特性について. 雪氷, **11**, 104.
- 6) Hill, R. 1950 The Mathematical Theory of Plasticity. 185. Oxford.
- 7) 吉田順五・黒岩大助 1950 衝撃荷重による積雪沈下の経過. 雪氷, **12**, 28.
- 8) 木下誠一 1953 雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗. 低温科学, **10**, 13.
- 9) 木下誠一 1955 衝撃による積雪の破壊 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 95.
- 10) 藤岡敏夫・疋田裕 1954 雪橇の抵抗 (II). 低温科学, 物理篇, **13**, 37.
- 11) Scott, J. M. 1933 The land that God gave Cain. 273. London, Chatto & Windus.
Cherry-Garrad, A 1922. The worst journey in the world. **2**, 456-7. London, Constable & Co.
- 12) Bowden, F. P. 1953 Friction on snow and ice. Proc. Roy. Soc., **A**, **217**, 462.

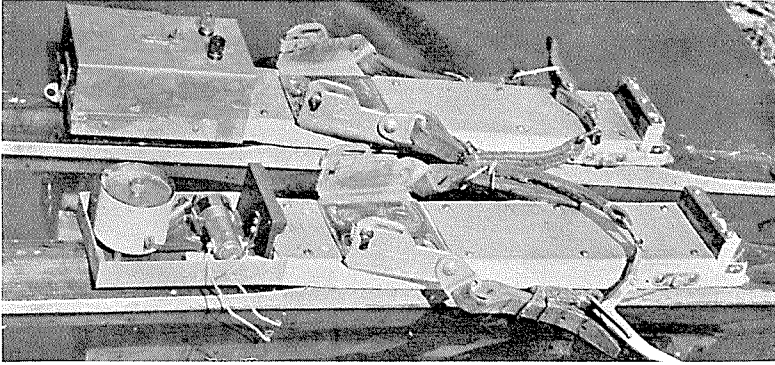
Résumé

Experiments on ski running were carried out on a slope of virgin snow. The force with which the foot of the skier pushed the ski forwards was registered automatically by instruments attached to each of the skis. The mean speed v of the skis and their frictional coefficient μ computed from the force registered on the instruments are plotted in Fig. 7 against the temperature T of snow. μ and v seem to have no distinct relationship with the temperature of snow.

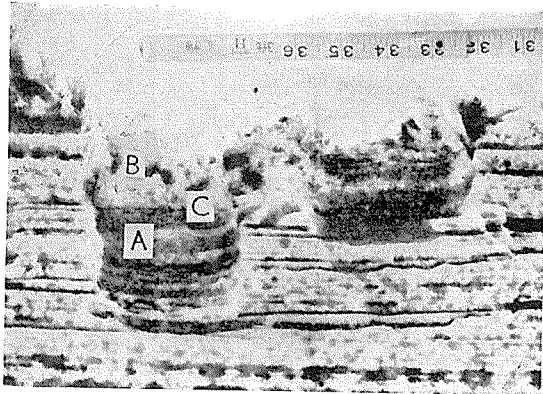
The vertical sections made in the snow perpendicular and parallel to the track of the ski were sprayed with coloured water and blazed by fire, so as to make visible the deformation of snow caused by the running skis. Photos (2a), (2b) and (2c) Pl. I show examples of such vertical sections. In these photographs, the part marked *A* is the snow compressed by the ski. Across the path along which the skis were to run a vertical crevice was made in the snow beforehand and rouge powder was put into the crevice so as to form a coloured plane in the snow. When the snow was cut along the ski path after the ski-running, the rouge plane manifested itself on the cut surface as a vertical straight line with its top curved. The curved part showed in which way the snow was displaced by the ski. The thick vertical dark lines with curved top in Photos (2b) and (2c) are such rouge lines.

In order to learn in what manner the snow became deformed by the skis, they were pulled forwards a short distance with a man standing on them and the snow was cut vertically along their length where they stopped. Photo (3) shows the cut surface. The layer of compressed snow extends with distinct boundary from the tip to the end of the ski. The rouge line at the root of the frontal bend of the ski stands obliquely straight in the layer of compressed snow while the one at the middle of the ski shows

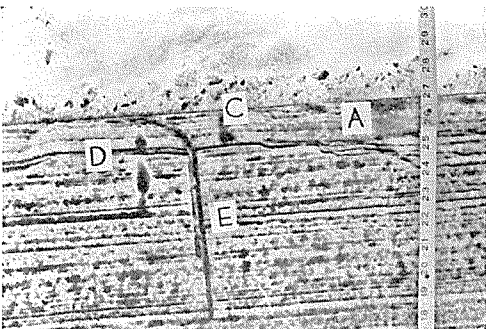
the same curved form as in the case of Photos (2b) and (2c). This fact indicates that the head of the ski compressed the surface layer of the snow uniformly deforming it plastically at the frontal boundary of the layer of compressed snow. A square 1 drawn in the snow as schematically shown in Fig. 4 will be deformed plastically into parallelogram 4 at the root of the frontal bend being compressed in the direction of the short axis AB of the ellipse circumscribed about the parallelogram. Then this parallelogram underwent horizontal deformation with the result that its oblique edges became curved as shown by the rouge line at the middle of ski of Photo (3). This change of the oblique straight edges of the parallelogram into curved ones appears to indicate that the snow continued to flow under the bottom surface of the ski like a viscous liquid until the parallelogram was passed over by the tail of the ski. But, as will be indicated by the following experiment, the flow must have been completed at a small distance behind the head of the ski, further flow being stopped thereafter. An annular metal plate was pushed on a rotating plate of snow into which a vertical crevice stained with rouge powder had been made. After one rotation of the snow the top of the rouge line had become curved and no further rotation of the snow brought about any change in its form.



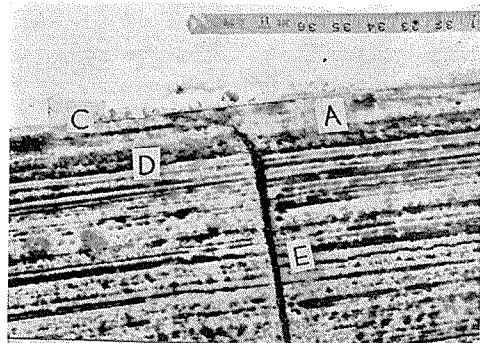
(1) 測定装置



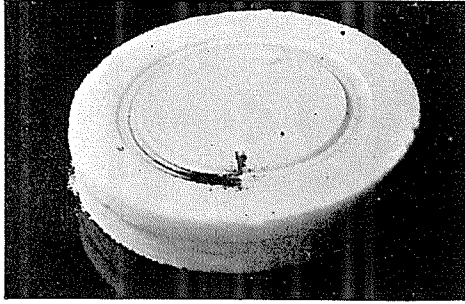
(2a) 右 足 左 足



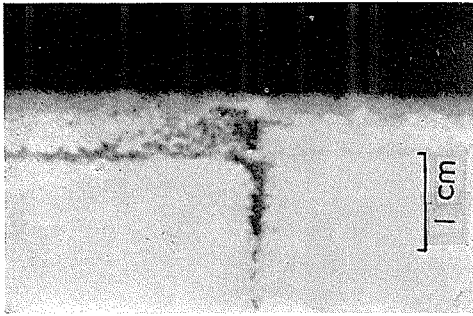
(2b) 右 足



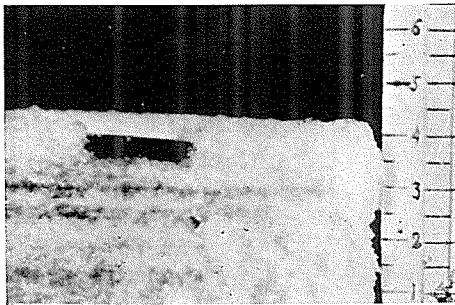
(2c) 左 足



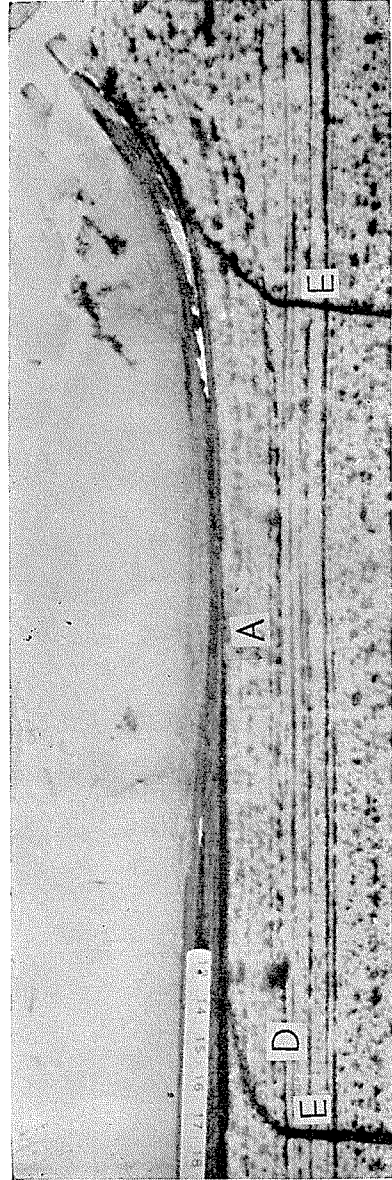
(4a) 輪のシュプール



(4b) ベンガラ着色線



(4c) 圧縮層



(3) 圧縮層 A, ベンガラ着色線 E