



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	薬剤で処理した雪面及び踏みかためた雪面のスキーの実走試験による動摩擦係数の測定
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke; 若浜, 五郎 他
Citation	低温科学. 物理篇, 27, 229-245
Issue Date	1970-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18114
Type	departmental bulletin paper
File Information	27_p229-245.pdf



薬剤で処理した雪面及び踏みかためた雪面のスキー の実走試験による動摩擦係数の測定*

黒岩大助・若浜五郎・藤野和夫

(低温科学研究所)

棚橋良次

(日本楽器製造株式会社 スポーツ用品部研究課)

(昭和44年7月受理)

I. ま え が き

この研究は1972年2月4日から11日間、札幌市で開催される第11回冬季オリンピック大会の組織委員会から委嘱された“オリンピックのための雪氷調査”の一環をなすものである。オリンピック競技の雪面としてはスキーの滑降競技にしても、回転競技にしてもコースの荒れをできるだけ少なくするためにある程度の硬さが要求される。スキー競技用の雪面としては密度が $0.45\sim 0.5\text{ g/cm}^3$ 、木下式硬度計で測った硬度で 10 kg/cm^2 以上あることがのぞましいということは既に報告した¹⁾。このような条件をそなえた硬い雪面を天然に求めようとすると、大雪山のような山岳で、一般に、アイスバーンとよばれている堅雪がそれにあたる。山麓の普通のスキー場では多くのスキー客によって長時間よく踏みかためられた雪面がほぼこの条件を満足している。しかし、このような雪面でも気温が 0°C をこえたり、降雨があったりすると雪は湿雪となり、みかけ密度はふえても硬度は著しく低下し軟雪になってしまう。こうなるとはやオリンピック競技には適当でない。しかもこのようなおそれはオリンピックが開かれる2月上旬の札幌地方でも十分高い確率をもっておこりうるのである。このような気温の上昇ともなる雪面の軟化は冬のヨーロッパのスキー場でもしばしばおこるとみえて、そんな場合、雪面を一時硬化させる目的で適当な薬剤を散布する方法がとられている。現にスイスの〔トブラー社〕によって商品名でスノーセメント (snow cement) なるものが発売されている。

スノーセメントの組成は明らかでないが、塩化アンモニウム及び塩化ナトリウムを主成分とするものであるらしい。スノーセメントは青色に着色した粉末散布剤であるから、スキーヤーは遠くからどの範囲の雪面に薬剤が散布されているかを容易に見分けることができる。スノーセメントはその成分から判断して一種の氷点降下剤と考えることができる。これを雪面に散布することによって雪温を下げ湿雪を凍結させるのが主な硬化の機構であろう。もしそうだとすれば工業用の塩化カルシウムの粉末でもスノーセメントの代用になりうる筈である。しかし、このような薬品処理によって多少雪面が硬化したとしてもそれで果してスキーが滑りやすくな

* 北海道大学低温科学研究所業績 第972号

るかどうかは別の問題である。この点は一応調べておく必要がある。スキーの滑りやすさの一つの目安となるものは雪面のスキーに対する動摩擦係数である。動摩擦係数は雪面のスキーに対する抵抗をあらわす係数でこの値が大きい程スキーは滑りにくい。雪面の動摩擦係数を測定するには適当な大きさの雪のブロックを切取ってきて実験室で模型のスキーをつかって測定することができる²⁾。しかし動摩擦係数は静止摩擦係数とちがって一般に速度によって変る。実験室の実験では雪面と滑走材との相対速度を秒速 10 m (時速 36 km) 以上にすることはいろいろな技術的困難をとともなうので実際の滑走速度に相当する高速度まで測定を行なうことはむづかしい。したがって、こんな場合、スキーの選手に実際の斜面を滑走してもらって摩擦係数を実測するということになる。実際のスキーをつかって雪面の動摩擦係数を測定した例としては藤岡敏夫の実験³⁾がある。藤岡は小型の測定器をスキーにとりつけ、スキーに働く雪の抵抗力を測定し動摩擦係数を求めた。しかし、この場合もスキーの滑走速度は最大 10~11 m/秒 ばかりであった。しかし、オリンピックの滑降競技では滑走速度は時速 100 km (28 m/秒) をこえることもあるという。それで、もっと早い速度まで雪の動摩擦係数を測定してみる必要がある。

この調査研究の目的は、湿った雪の上にスノーセメントや塩化カルシウムの粉末などを散布し、雪面を硬化させ、硬度や雪質の時間的変化を観測すると同時に、試走者にスキーでその上を走らせて動摩擦係数を測定したものである。試験は昭和 44 年 2 月 12~13 日の 2 日間長野県戸隠スキー場 (海拔 1400 m) で行なった。積雪の観測は黒岩、若浜、藤野が担当し、動摩擦係数の測定は棚橋が担当した。

II. 実走による雪面の動摩擦係数の測定法

いま傾斜角が θ の斜面を滑降しつつあるスキーを含めた試走者 (テストライダー) の質量を M 、滑走速度を v 、雪面の動摩擦係数を μ_k とすると試走者の運動方程式は次の式であらわされる。

$$M \frac{dv}{dt} = Mg (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) - Dgv^2 \quad (1)$$

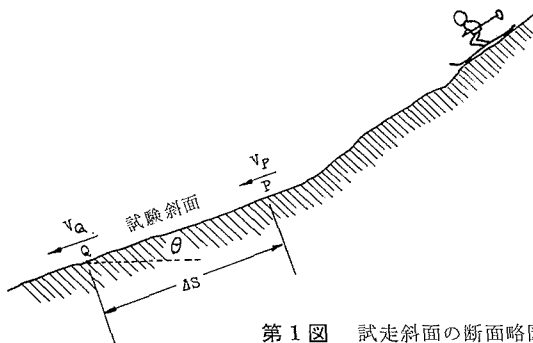
ここに g は重力の加速度、 D は一定姿勢で滑走しつつある試走者に働く空気の抵抗係数である。この式は、試走者に働く慣性による力が、体重にもとづく斜面方向の分力からスキーに働く摩擦抵抗と速度の自乗に比例して増大する空気の抵抗力とを差引いたものに等しいことを示す。もし傾斜面が一定で十分長い斜面があり、試走者がストックで加速することなく一定速度で滑るとすると、スキーの速度は終速度になって、(1) 式の左辺は 0 となり μ_k は

$$\mu_k = \frac{M \sin \theta - Dv^2}{M \cos \theta} \quad (2)$$

となる。試走者に働く空気の抵抗係数 D がわかれば、傾斜角と v を測定することによって μ_k を求めることができる。実際のスキーに働く抵抗は滑走面と雪面との間の純粋な摩擦のほかスキーがシュプールをつけるための抵抗 (すなわち、雪面の変形に対する抵抗) がふくまれる。したがって、ここにいう μ_k はその両者をふくんでいる。

しかし、実際のスキー場で傾斜の一樣な長い斜面を選ぶということはむづかしい。雪面の

μ_k が同じであっても、斜面の傾斜は場所によって異なっておりスキーの速度は決して一定にはならない。従って(1)式の左辺は0にはならない。こんな場合(1)式を解いて μ_k を求めるのは、かなりやっかいな問題*である。そこでわれわれは次のようにした。第1図のようにほぼ傾斜角 θ が一定とみなされる斜面の上に、試験区間 P, Q を設け \overline{PQ} の間隔 ΔS をできるだけ小さくとると、この区間の θ はほぼ一定と考えることができる。そこで、P 点及び Q 点を通過するスキーの瞬時的速度 V_P, V_Q を測定できたとすると、この区間を平均速度 \bar{V} で通過したときの動摩擦係数 $\mu_k(\bar{V})$ を次の式によって求めることができる。



第1図 試走斜面の断面略図

試験区間 P, Q を設け \overline{PQ} の間隔 ΔS をできるだけ小さくとると、この区間の θ はほぼ一定と考えることができる。そこで、P 点及び Q 点を通過するスキーの瞬時的速度 V_P, V_Q を測定できたとすると、この区間を平均速度 \bar{V} で通過したときの動摩擦係数 $\mu_k(\bar{V})$ を次の式によって求めることができる。

$$\mu_k(\bar{V}) = \frac{E - gD \Delta S \left\{ \left(1 - \frac{g}{M} D \Delta S \right) V_P^2 + \Delta S \cdot g \cdot \sin \theta \right\}}{Mg \cos \theta \cdot \Delta S \left(1 - \frac{g}{M} D \Delta S \right)} \quad (3)$$

ここに $E = -\frac{1}{2} M (V_Q^2 - V_P^2) + Mg \sin \theta \cdot \Delta S$,

V_P …… P 点を通過するときの速度,

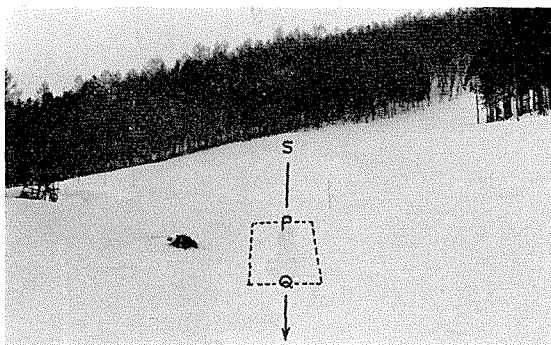
V_Q …… Q 点を通過するときの速度,

$\bar{V} = \frac{1}{\Delta S} \int_P^Q V(S) ds$: P, Q 間の平均速度,

$D(\bar{V})$: 平均速度 \bar{V} で滑走しつつある試走者に働く空気の抵抗係数である。

(3) 式は(1)式をエネルギーの式に書き改め積分することによって求められるが、この式によって $\mu_k(\bar{V})$ を求めるためには、 $V_P, V_Q, D(\bar{V})$, 及び傾斜角 θ を知らなければならない。

第2図は試験を実施した戸隠スキー場の写真である。S が出発点で試走者(テストライダー)は S から最大傾斜線に沿い矢印のごとく下に向かって直滑降する。P~Q の区間が試験斜面でこの区間がスノーセメントや塩化カルシウムを散布したり、つぼ足やスキー

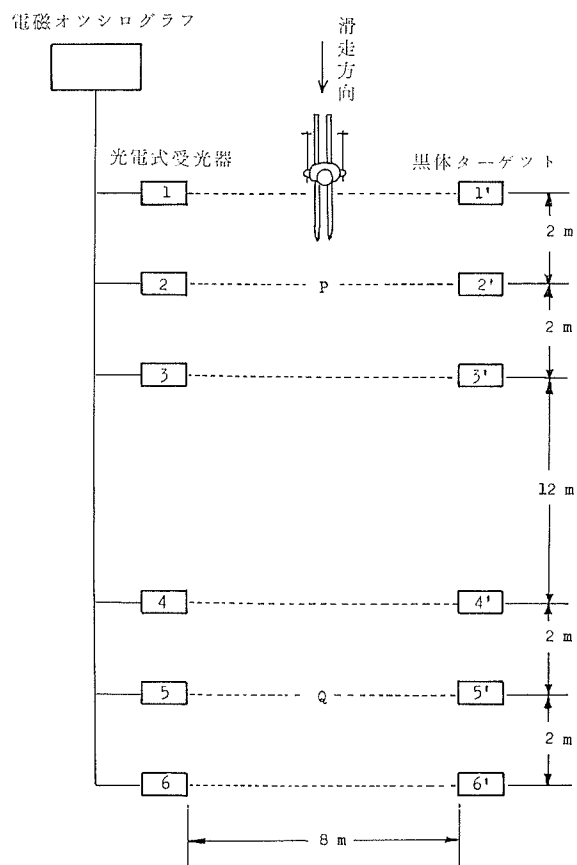


第2図 戸隠スキー場の試験斜面 (P-Q) S は出発点

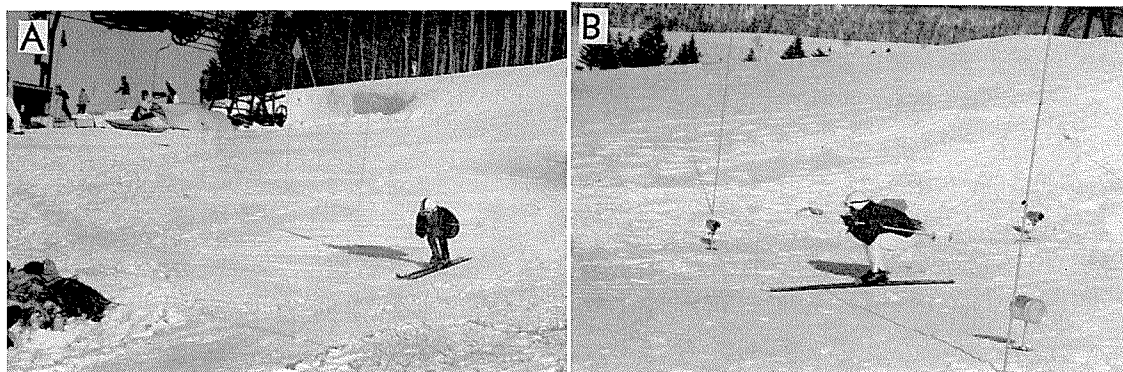
で踏みかためたりした雪面である。P 点から上方の斜面の傾斜は約 20° であったが、P~Q の区間は $11^\circ \sim 12^\circ$ であった。したがって $\theta = 11.5^\circ$ = 一定とした。

第3図は試験斜面上の2点 P 及び Q を通過するときの速度 V_P, V_Q を求めるための光電測

* 藤岡の実験³⁾では選手の運動は等速度であると仮定されている。



第 3 図 滑走速度測定用光電受光器の配置図



第 4 図 試走者の滑走中の姿勢
前方に光電受光器，手前に黒体ターゲットがみえる

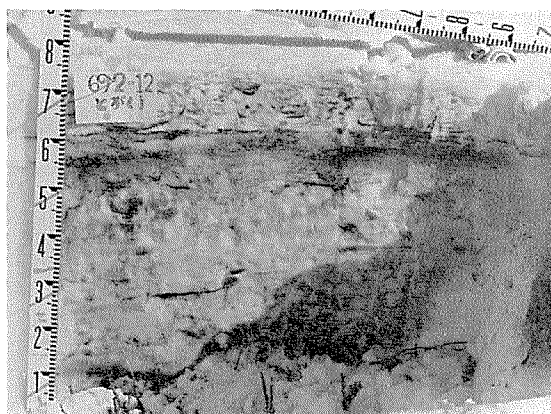
定装置の配置図である。光電式受光器と黒体ターゲットの間に何もなければ、オシログラフのフレは極小であるが、スキーの試走者がこの間をよぎるとその反射光が受光器に入り、オシログラフにフレを与える。図のように配置した6個の光電受光器の記録からP点及びQ点を通過するスキーの速度が求められる。なお、試走者に働く空気の抵抗係数 $D(\bar{v})$ は、速度、試走者の姿勢、レイノルズ数などで変る。したがってこの値の正確な値は、試走者に滑走中の姿勢をとらせつつ風洞実験を行なって求めなければならない。しかし、この実験では、試走者を断面積が 0.42 m^2 、高さが 0.98 m の円筒とみなし、円筒に働く空気の抵抗係数の変化から $D(\bar{v})$ の値を推定して使うことにした(測定法の詳細は、棚橋の論文⁴⁾参照)。第4図は試験斜面の上を滑走しつつある試走者の姿勢で、試走者は出発点をスタートすると、スキーのうえにしがみ、ストックを小脇にかかえた姿勢で直滑降した。

III. 測定結果

i) 処理していないゲレンデ雪面の雪質、硬度と動摩擦係数

このあとの人工的にいろいろに処理した雪面での測定と比較するため、まず無処理のゲレンデ雪面の雪質、硬度及び動摩擦係数を測定した。ここに無処理のゲレンデ雪面といったが、これはわれわれが意識的につぼ足で踏みかためたり、または薬剤処理をしていないという意味であって、雪面は冬の初めから多くのスキーヤーによってかなり踏みかためられているのである。

第5図は1969年2月12日午後1時30分、試験コースのすぐそばの積雪を斜面に垂直に掘って断面を出し、これにインキで着色して成層構造を示したものである。写真にみられるように上層 $10\sim 15\text{ cm}$ は一般スキーヤーによってふみかためられ、成層構造がかなり乱れている。



第5図 戸隠スキー場の積雪の断面。表面近くはスキーヤーによって踏みかためられている

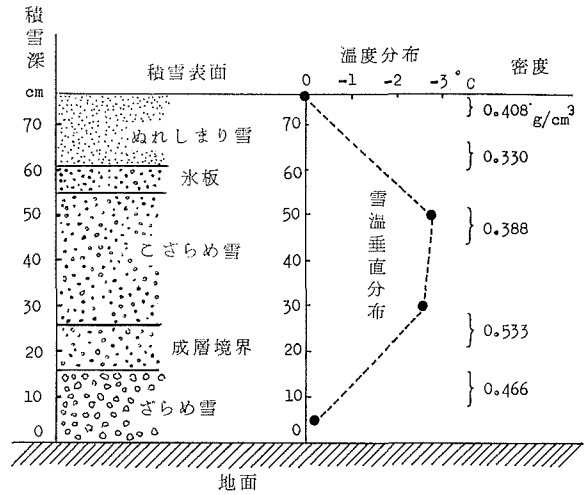
第6図はこの断面の見取り図で、2月12日現在の積雪深は約 77 cm であった。含水率は $13\sim 14\%$ であった。雪温は、表面と接地部で 0°C のほかは全層がマイナスで、表面下 27 cm で極小値 -2.7°C が観測された。一番右の数字は代表的な雪の層の密度である。

第7図はこのような表層のぬれしまり雪の粒子構造を示す薄片の偏光でとった顕微鏡写真である。スキーヤーによってふみかためられているので、よくしまっていることがわかる。ぬれしまり雪はそのままでは薄片にすることはできない。一たん 0°C 以下に凍結し、アニリンで固定して薄片にする。したがって粒子構造はぬれているときとはかなり異なっているおそれがある。しかし含水率は $13\sim 14\%$ であったから、これらの水分が完全に凍結したとしても、巨

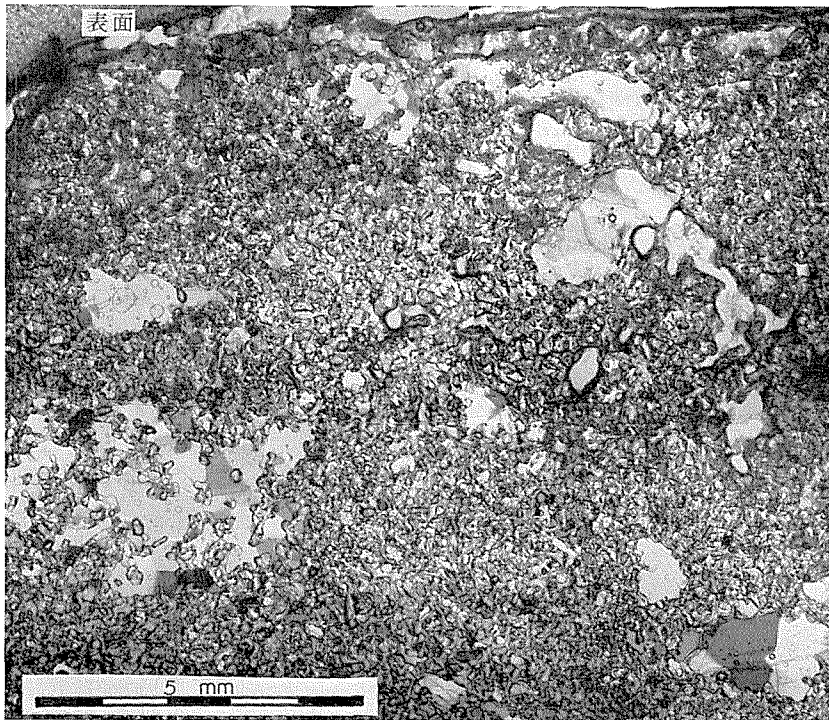
視的にみた粒子構造はぬれている場合とほとんど大差ないものと考えてよい。しかし、図のところどころにみられる大きな結晶の部分は、ぬれしまり雪のなかにたまっていた水が、薄片をつくる時に凍結したものと考えられる。

次に第8図に自然状態にある試験雪面での硬度分布を示す。われわれは木下式硬度計⁵⁾で受光器とターゲットの間を3箇所ずつ、コースをはずれたところの代表的な位置を3箇所ずつ合計27箇所測定した。図に記入した各測定値は、5箇所 hardness の平均値である。27箇所 hardness の測定値を全部平均した値は 1.7 kg/cm^2 である。

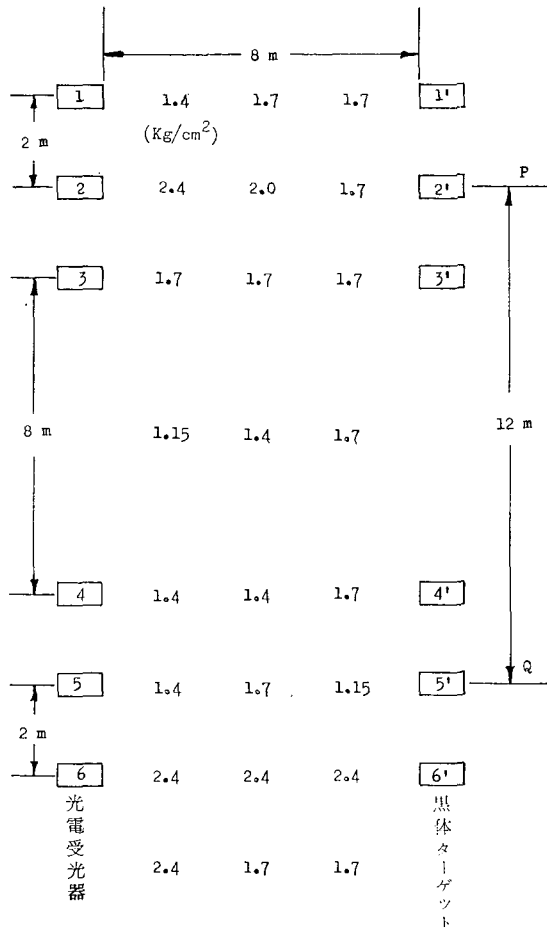
このような湿雪の表面を2名の試走者に滑走速度をいろいろ変えてすべってもらった。第9図にその結果を示す。使用したスキーの滑走面の材質はポリエチレンで、ほとんど生地のままのもの(以下P-Eとかく、但しこの滑走面には前回使用したワックス、ホルメンコーレン赤



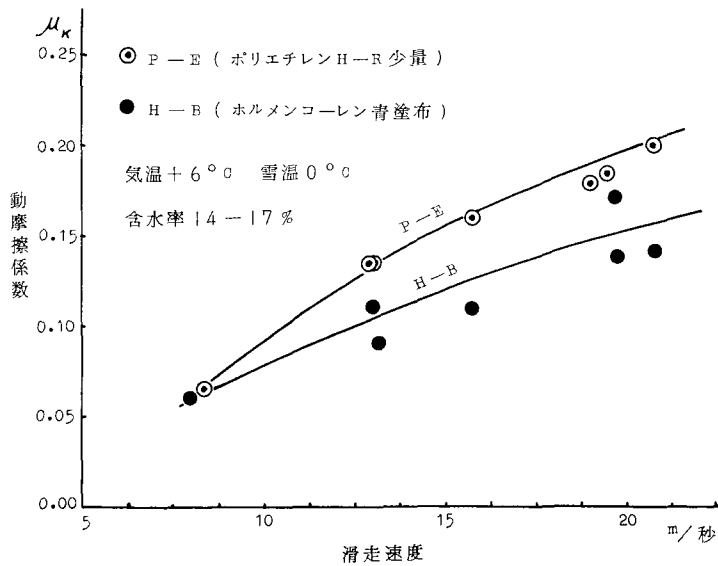
第6図 戸隠スキー場の積雪の断面構造と雪温、密度の垂直分布



第7図 つば足で踏みかためる前のゲレンデ雪面の粒子構造を示す薄片の偏光顕微鏡写真



第 8 図 つぼ足で踏みかためる前の表面の硬度分布



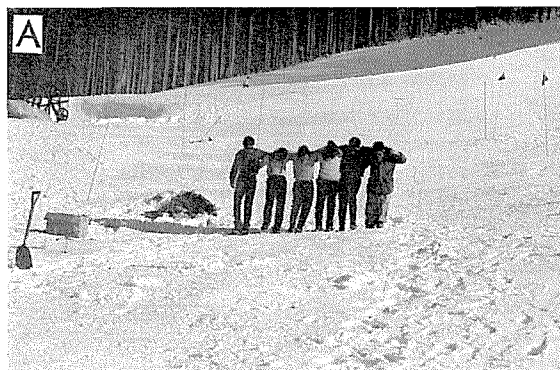
第 9 図 つぼ足で踏みかためていない湿雪面の μ_k の特性

が少量残っていた)と滑走面にワックスとしてホルメンコーレン青(以下H-Bとかく)を塗布したものを使用した。グラフには前者を◎印, 後者を●印で示してある。

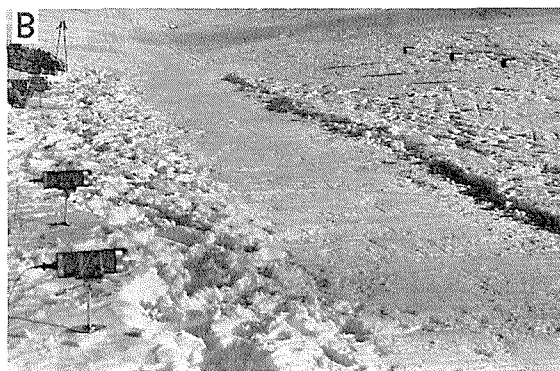
図にみられるごとく μ_k の値は滑走速度の増大と共に増してゆくが, ポリエチレン(P-E)スキーに対する μ_k のバラつきは, ワックスを塗ったスキー(H-B)に比べると少ない。なぜワックスを塗ったスキーの μ_k の値がバラついたかくわしい理由はわからないが平均的にみれば, ワックスをほとんど塗っていないスキーに比べて摩擦抵抗は小さいといえる。この試験は無風, 快晴の状態で13時30分より15時の間に行なった。この間気温は $+7^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{C}$ の間で変動していた。雪面の含水率は14~17%であった。

ii) つぼ足で踏みかためた雪面の硬度と動摩擦係数

無処理の積雪面での試験が終了してから試験斜面を2m幅でたてに三つに分け, その一区割をシャベルで掘りかえし, 数名が一行にならんでつぼ足で丁寧に踏みかためた(第10図A)。つぼ足で踏んだだけでは雪面に凹凸がのこるので, このあとスキーで平らに踏みつけた。この

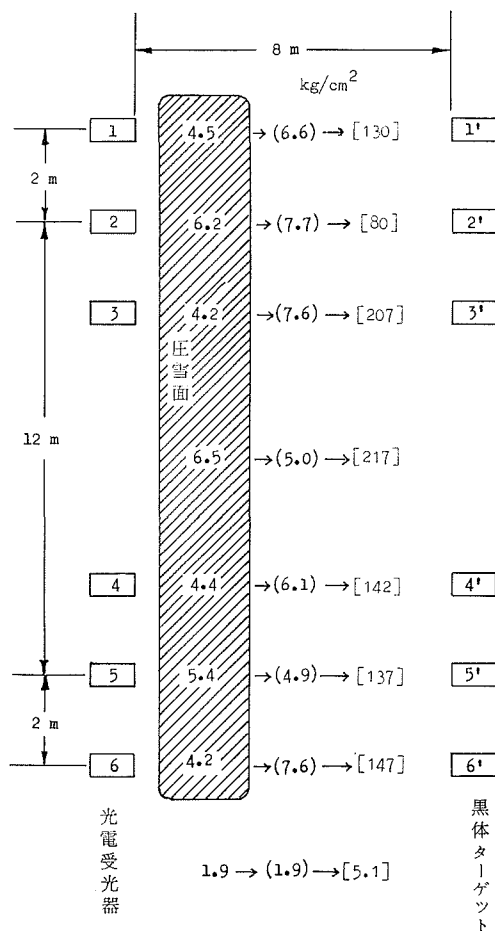


つぼ足でふみかためているところ



そのあとをスキーで平らにしたところ。手前は光電受光器コースの向側には黒体ターゲットがみえる

第10図 踏みかためた試験雪面

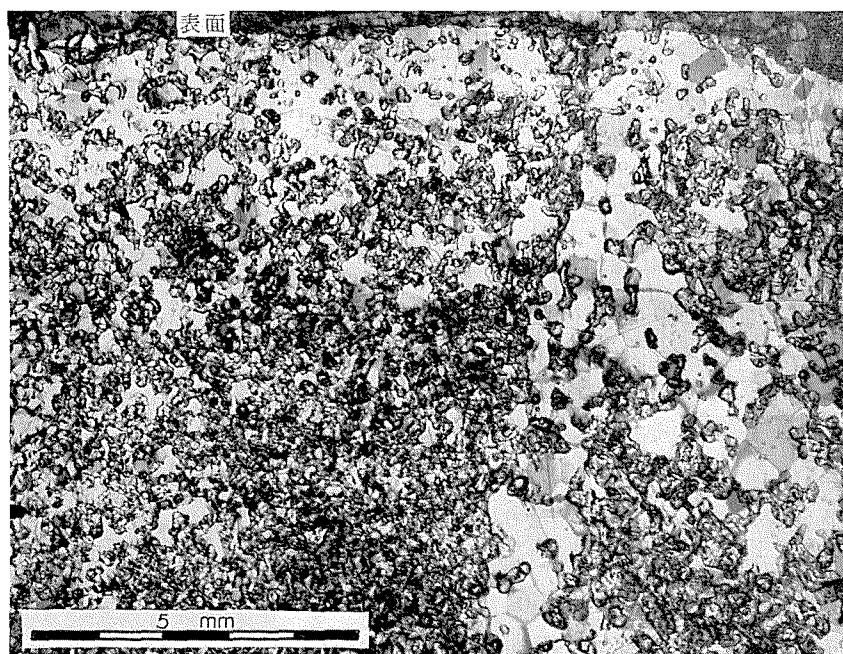


第11図 踏みかためた試験雪面上の硬度分布。単位は kg/cm², () の値は 40~50 分後, [] の値は一晩放置したあとの値

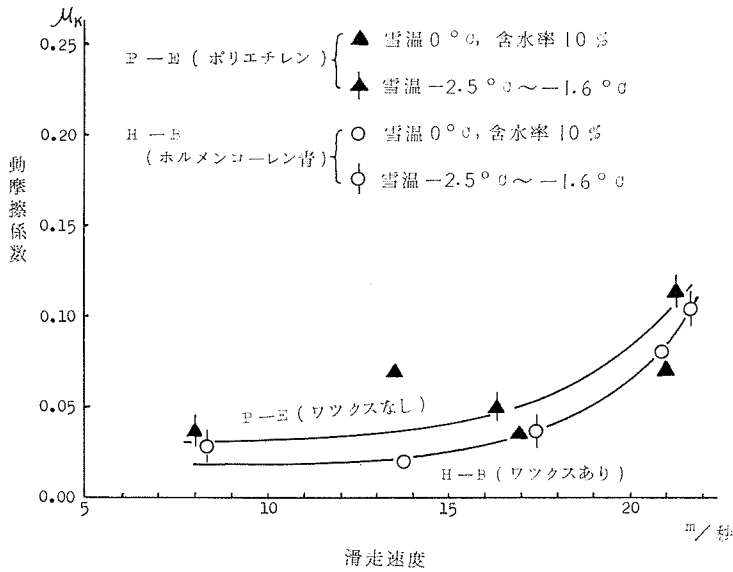
作業は 15 時 30 分より 16 時の間に行なった。第 10 図 B の写真はこのようにして踏みかためた直後の試験斜面である。

次いで滑走試験を行なう前にこの斜面の硬度測定を行なった。第 11 図にコースにそって測定した硬度の分布を示す。斜線をほどこした部分が圧雪されたコースである。一個所の測定値は同じ場所での 4~5 回の測定の平均値である。踏みかためた雪面上 7 個所の平均値は 5.05 kg/cm^2 である。一番下の数字はコース外の硬度で、その値は 1.9 kg/cm^2 である。したがって、踏みかためられた直後の雪面の硬度は約 2.5 倍に増大したことがわかる。このとき、気温は $+2.3^\circ\text{C}$ 、雪面の含水率は 10.6% であった。なお、第 11 図で () で囲んだ数字は、この測定から約 40~50 分たって再び測定した圧雪コースの上の同じ場所の硬度である。40~50 分しかたっていないのに、2 個所を除いてのこりの 5 個所は何れも前の値よりも大きな数値を示している。コース上の () で囲んだ値の平均値は 6.5 kg/cm^2 である。踏みかためてから 40~50 分の間に硬度が 1.4 倍に増加したわけである。これに反し、ふみかためられていない場所の硬度は依然としてもとのままで 1.9 kg/cm^2 であった。このように硬度が時間と共に増大してゆく現象はいわゆる時効硬化 (age hardening) とよばれる現象であって、湿雪の場合は雪の粒子をつつんでいる水の膜の存在によって粒子間の結合が急速に進んだものと思われる。この現象はふみかためによって硬化雪をつくる場合、湿雪の状態の雪をふむと大変効果的であることを示唆するものである。() でかこんだ数字のとなりの [] で囲んだ数字は、この雪面を一晩放置して翌朝測定した硬度の値である。夜間の冷却によって雪面は凍り、硬度が大いに増大したことを示すものである。

第 12 図は踏みかためた直後の湿雪表面層から鉛直にきりだした薄片の顕微鏡写真である。



第 12 図 踏みかためられた雪面の表層の構造を示す偏光顕微鏡写真

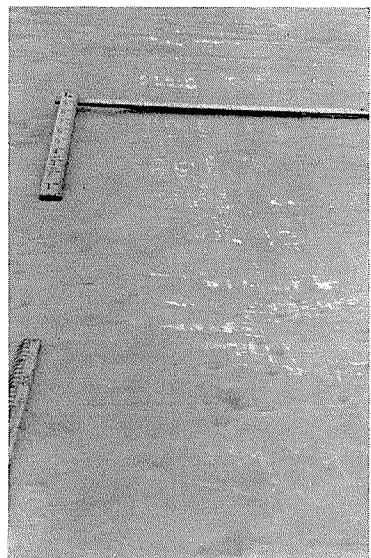


第 13 図 つぼ足で踏みかためた雪面の μ_k の速度依存性

まえにものべたように湿雪の薄片をつくる過程でそのなかに含まれたとけた水は、その場で凍結する。したがって写真にみられるように表面の近くの薄い雪の層はほとんど氷化し、つながりあっているばかりでなく、たてにも深く氷化した部分が侵入しているのがみられる。これらは勿論融雪水が凍結したものであるが、一晚放置した雪面の硬度が大いに増大するのも同じ機構によると考えられる。したがって第 12 図の薄片の写真は、一晚放置したあとの踏みかためた雪面の粒子構造をあらわしていると考えても差支えない。

さてこのようにしてふみかためられた雪面の動摩擦係数の測定値を第 13 図に示す。ワックスを塗っていないスキー、P-E の値は▲印で示し、ワックスを塗ったスキー、H-B の値は○印で示した。図の中で▲印と○印は含水率が 10% の湿雪状態のときの測定値で、たてに棒の入った印は、一晚たって翌朝の雪面温度が $-2.5^{\circ}\text{C} \sim -1.6^{\circ}\text{C}$ のときに測定した μ_k の値である。この図をつぼ足で踏みかためていない雪面での実験第 9 図と比べてみると次のことがわかる。まず、踏みかためていない雪面での μ_k の滑走速度に対する曲線は下向きに凸であるが、踏みかためていない雪面でのそれは上向きに凸である。踏みかためていない雪面では、ワックスを塗ったスキーの μ_k の値はワックスを塗っていないスキーのそれに比べてバラツキが多いが、踏みかためた雪面の上ではその関係が逆になっている。なぜこのようになったか理由はあきらかでない。

これら両図を比べると、実験を行なった速度範囲では、踏みかためた雪面上での摩擦係数は踏みかためていない雪



第 14 図 踏みかためられた雪面にのこされたシュプール

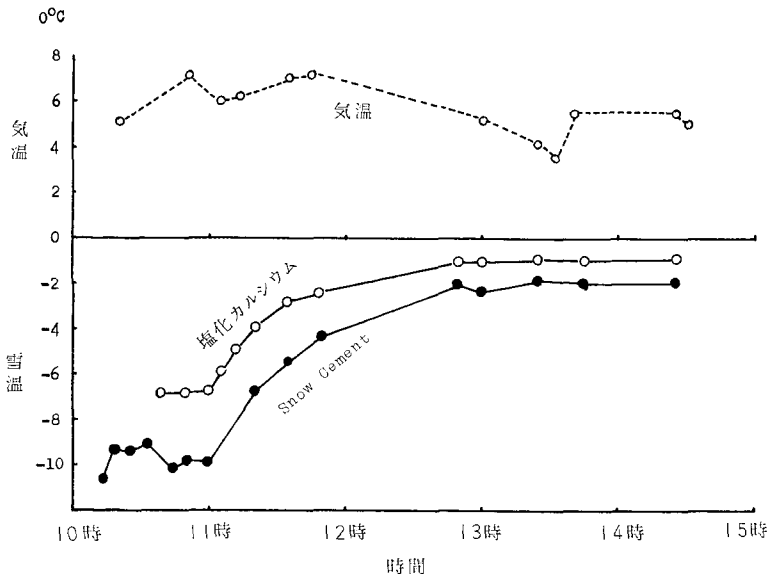
面上でのそれよりもかなり小さいことがわかる。第13図にみられるごとく、踏みかためられた雪面上では、 μ_k の値は、湿雪面と、凍結面とで大差がない。しかし、硬度には大きな差があるのである。第11図に示したように、湿雪状態でのコースの上7個所の硬度の平均値は 6.5 kg/cm^2 であるが、翌朝雪面が凍結した状態では、その平均硬度が前日の23倍に当る 150 kg/cm^2 に増加したのである。

第14図はこのようによく踏みかためられた雪面のうえにのこされたスキーのシュプールを示す写真である。鏡の面のように輝いている部分がスキーの底が雪面と実際に接触した部分である。やわらかい雪面の上では深いシュプールがのこされる。しかし、踏みかためた雪面上でのシュプールはこのように非常に浅い。この斜面を滑走した試走者の言によると、スキーが斜面上方の軟雪部からこの踏みかためられた領域に入ると急に大きな加速を受けるとのことであった。

iii) スノーセメント、塩化カルシウム及び踏みかためた雪面の 硬度、雪温、含水率、 μ_k の時間的变化

2月13日午前10時すぎには、気温は $+5^\circ\text{C}$ となり雪面はとけ始めたので、それ以後はスノーセメントと塩化カルシウムの散布試験を行なった。前述の踏みかためた雪面に平行にスノーセメント散布コース及び塩化カルシウム散布コースをつくり、各コース毎の硬度、雪温、含水率(踏みかため雪のみ)、 μ_k の時間的变化を測定した。スノーセメントや塩化カルシウムが湿雪面を硬化させる作用があるとしても、その効果がほぼ何時間持続できるか、薬剤で処理した雪面の μ_k はどんな値になるか、その時間的变化を知っておく必要があるからである。

スノーセメントはスイスのトブラー社製のもの、塩化カルシウムは日本曹達株式会社製の純度75%の粉末である。スノーセメントも、塩化カルシウムも、ともに一種の水点降下剤であ

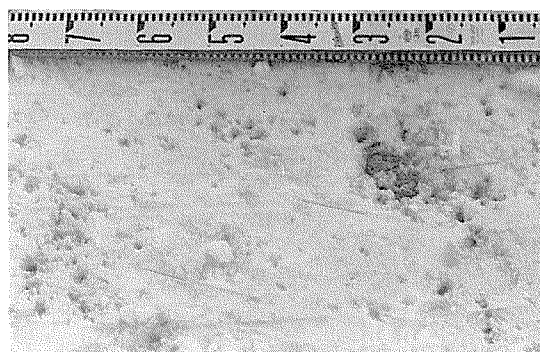


第15図 スノーセメントと塩化カルシウムを散布した雪面下3cmの雪温の時間的变化

る。したがってこれらの薬剤を湿雪面に散布すると、雪も薬剤ももにとけつつ、周囲の雪から融解の潜熱を吸収して雪温を下げる。理論的にはその薬剤の共融点、たとえば塩化アンモニウムなら -15.4°C 、塩化カルシウムなら -55°C までは下りうる。いわゆる寒剤としての役割をするので、まわりの湿雪は凍結して硬度を増すと考えられる。しかし、この化学的につくり出された低温で冷された雪はやがて周囲からの熱伝導によってあたたまり始める。温度上昇ともなると薬剤の平衡濃度も変る。その結果、一たん凍結した湿雪は再びとけはじめ、硬度が次第に小さくなる。こうなると薬剤はもはや、雪を硬化させる効果がないばかりか、逆に雪をとかして弱くする。

スノーセメントは処方によると、一平方メートル当たり 100 g の割合で散布するのが効果的であるといわれている。そこでこころみにスノーセメントと塩化カルシウムの粉末をともに 100 g/m^2 の割合で湿雪面に散布し、雪面下約 3 cm 位のところに温度計を差込んで、雪温が時間と共にどのように変ってゆくかを調べたのが第 15 図である。たとえばスノーセメントを例にとると、雪温は 0°C から一挙に -10°C 位まで下り、それからゆっくりと上昇し、約 3 時間で -2°C になり、それ以後はあまり変らない。塩化カルシウムの場合も大体同じような経過をたどる。しかし、この図をみてスノーセメントの方が塩化カルシウムよりも雪温を下げる効果がつねに大きいと速断してはならない。なぜかというとなスノーセメントも塩化カルシウムも雪面に一樣な濃度で散布することは難しく、場所によって散布量にムラができる。たとえば第 16 図の写真はスノーセメントを散布した雪面の一部であるが、このように決して一樣に散布されていない。したがって散布量の多い雪面の下での温度は、散布量の少ない場所に比べて低くなる。したがって、第 15 図のたての軸の温度の低下量は直接の比較にはならない。ただ薬剤を散布したあとの雪温がどんな経過で上昇してゆくかを知る一つの目安になる。スノーセメントも塩化カルシウムもともに吸湿性の強い薬剤である。なるべく雪面に一樣に散布されるように工夫すべきである。

第 17 図はつば足で踏みかためた雪面に平行して約 2 m の幅でスノーセメントと塩化カルシウムの粉末とを約 100 g/m^2 の割合で散布したときの写真である。スノーセメントの場合も塩化カルシ



第 16 図 スノーセメントを散布した直後の雪面



- A. 踏みかためた雪面
- B. スノーセメントを散布した雪面
- C. 塩化カルシウムを散布した雪面

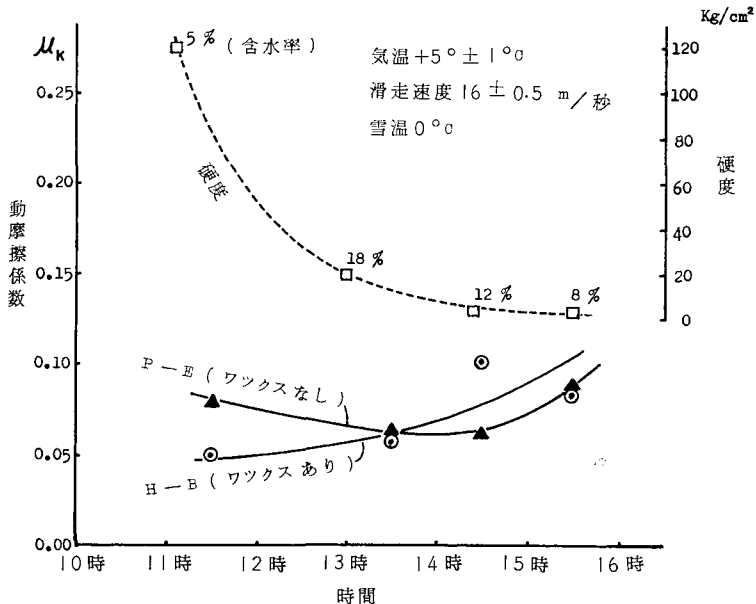
第 17 図

ウムの場合も散布してから直ちに表面をスキーで平らに圧密した。以後、単につぼ足で踏みかためたコースを A、スノーセメントを散布したコースを B、塩化カルシウムをまいたコースを C とよぶ。これら A, B, C 三つのコースを試走者に交互に数回ずつすべらせ、時間がたつと共にそれぞれのコースの硬度、雪温、含水率、摩擦係数がどのように変わっていくかを調べた。比較試験は次のような要領で行なった。試走者の滑走速度がすべて 16 ± 0.5 m/秒 となるように、滑降の出発点の位置をきめた。A, B, C の順で各コースを滑り、それぞれの μ_k を求める。ここで一たんテストを中止し、A, B, C 三つのコースの硬度、含水率、雪温を測定する。次に A, B, C の順で同じ速度で μ_k を求めるという方法をくりかえすのである。このようにして 11 時 30 分から 16 時まで 4 回のテストをくりかえした。ただし、第 3 回目のテストが終わったとき (15 時頃) B コースにはスノーセメントを、C コースには塩化カルシウムをそれぞれ 100 g/m^2 の割合で追加散布し第 4 回目のテストを行なった。

さて測定開始直前 11 時には気温がすでに $+4^\circ \sim 5^\circ \text{C}$ に上昇し、積雪表面では融雪が始まっていた。このとき、前日踏みかためた A コースの表面の雪の含水率は 5% であった。このとき A コースの上の代表的な場所 7 個所について硬度を測定したところ、平均値として 120 kg/cm^2 をえた。

これに対し薬剤を散布した B, C コースの上の、それぞれ 7 個所の硬度の平均値は 2.9 kg/cm^2 及び 2.6 kg/cm^2 であった。無処理のゲレンデ雪面の硬度は $1.9 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ であったから、B, C コースの硬度が薬剤散布のため雪面の硬度がとくに変化したということとはできない。

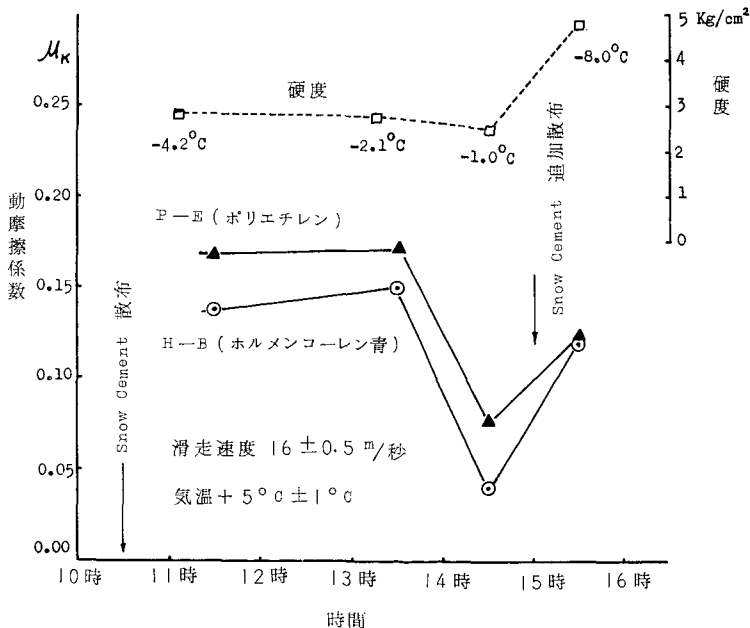
次に第 18 図に A コースの雪面の硬度、含水率、 μ_k の値が時間の経過と共にどのように変化したかを示した。気温は $+5^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ であったから、時間がたつと共にコースの表面の雪はとけ、硬度は時間と共に急速に減少した。すなわち、11 時には 120 kg/cm^2 もあった硬度が、13



第 18 図 踏みかためた雪面の硬度、含水率、 μ_k の時間的变化 (速度は一定)

時には 20 kg/cm^2 に激減した。このとき含水率は 18% であった。すなわち積雪表面の融解は大に進んだことになる。14時30分に測定した硬度の平均値は 3 kg/m^2 (このとき含水率は 12%) であって、もはや自然積雪表面の硬度となんら変らない値であった。15時30分に測定した硬度の平均値は 2.7 kg/m^2 (含水率は 8%) であった。第18図で▲印と◎印を結ぶ実線はそれぞれ、ワックスなし、及びワックスとしてH-Bを塗布したスキーに対する雪面の μ_k の時間的変化を示す。滑走速度は $16 \pm 0.5 \text{ m/秒}$ で一定である。雪面の硬度と含水率は図に示すごとく、時間と共に大幅に変化したのに μ_k の値にはそれほど大きな変化は観測されず、 $0.05 \sim 0.10$ の範囲にとどまった。この事実は、下層をよく踏みかためておきさえすれば、気温が多少上昇し、表面の雪がとけて含水率がふえ、硬度がへっても、スキーの滑走抵抗にはそれほど大きな影響をあたえないことを示している。このことは、すぐ次にのべる薬剤で表面処理をした雪面の μ_k の時間的変化と大いに異なる点である。

次にスノーセメントを散布したBコースの硬度、雪温、 μ_k の時間的変化を示そう。第19図がそれである。スノーセメントは10時30分に散布した。コースの代表的な場所の表面から3cm下の雪温は、11時には -4.2°C であった。このときコースの上7個所で測った硬度の平均値は 2.9 kg/cm^2 であった。雪温は13時頃には -2.1°C 、14時30分頃には -1.0°C に上昇し、硬度は 2.5 kg/cm^2 に低下した。まえにものべたように、この値は自然積雪面の硬度とほとんど同じであるから、スノーセメントが雪の硬度を増したという効果はほとんどあらわれていない。15時にBコースの上に再び 100 g/m^2 の割合でスノーセメントを追加散布した。15時30分の雪温は、このため -8°C に低下し、硬度の平均値は 4.8 kg/cm^2 に増加した。ここではじめてスノーセメントの効果がみられたのである。ポリエチレンスキー(P-E)とワックスを塗ったスキー(H-B)に対する μ_k の値は図に示したような変化を示した。すなわち両方共、 μ_k は初め

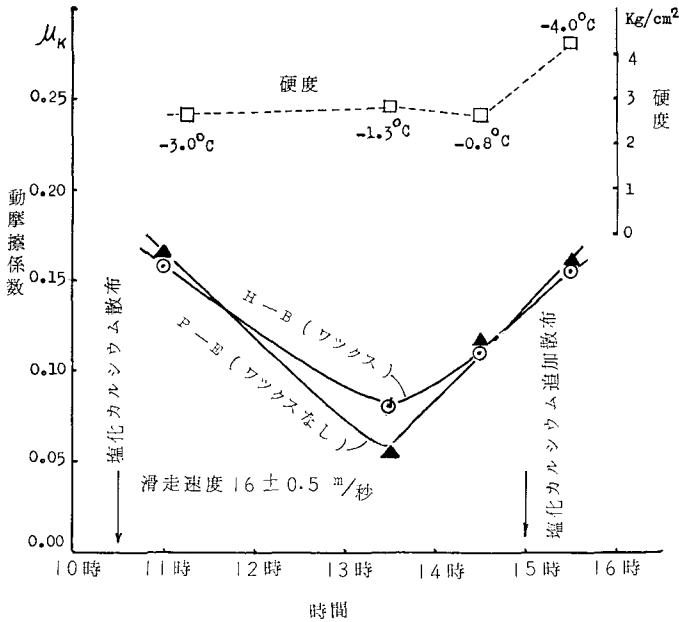


第19図 スノーセメントを散布した雪面の硬度、 μ_k の時間的変化

は大きな値を示したが、10時30分に散布したスノーセメントがほとんどけてなくなったと考えられる14時30分頃には、 μ_k の値は小さくなった。しかし、15時にスノーセメントが追加散布されると、 μ_k は再び増加した。この実験からスノーセメントを散布すると、 μ_k は踏みかためた雪面の μ_k よりも数倍大きくなるのがわかる。したがってスキーに対する滑走抵抗も増大するのである。

第20図は塩化カルシウムを散布したCコースの硬度、雪温、 μ_k の時間的変化を示す。塩化カルシウムは10時30分頃散布し、15時に再び100 g/m²の割合で追加散布された。硬度、雪温の時間的変化はスノーセメントの場合とほぼ同様であったが、 μ_k の時間的変化はスノーセメントの場合とやや異なり、 μ_k の極小値は13時30分に観測された。15時に塩化カルシウムを追加散布すると、 μ_k は再び増加し、最初の11時における測定値とほとんど等しくなった。

この実験でも塩化カルシウムで処理した雪面の摩擦抵抗は、踏みかためた雪面に比べて大きくなるということが出来る。

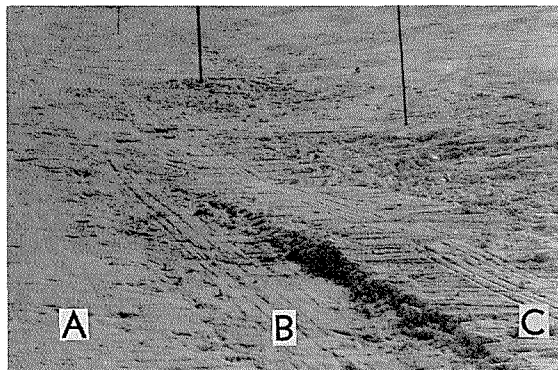


第20図 塩化カルシウムを散布したCコースの硬度、 μ_k の時間的変化

IV. 結 語

オリンピック競技のための雪氷の基礎的調査の一部として、つぼ足で踏みかためた雪面、スノーセメントや塩化カルシウムを散布した雪面の硬度、雪質、含水率、雪温、粒子構造などを調べた。同時に、この上をスキーで実走することによって、これらの雪面の動摩擦係数(μ_k)を測定した。動摩擦係数は雪面のすべりやすさの目安となる一つの物理量である。湿雪をふみかためるとみかけ密度は0.45 g/cm³程度に圧密され硬度は6.5 kg/cm²になるが一晩放置したあとではその硬度は150 kg/cm²に増すことがわかった。このような硬雪面の μ_k は0.03~0.1

であった。このように硬い雪面でも気温が上昇し、融解が始まると、硬度は急速に減少してゆくが、 μ_k の値はそんなに変わらないことがわかった。これは下層の雪がよく踏みかためられているからであろう。これに反しスノーセメントや塩化カルシウムを散布した雪面の μ_k の値は0.15ぐらいで、踏みかためた雪面より大きな値であった。この主な理由は薬剤散布が均等にゆかず雪のとけかたが場所によってムラになりコースの表面が荒れるからである。第21図はA(踏みかためた雪面)、B(スノーセメント散布面)、C(塩化カルシウム散布面)、3つのコースのうえのシュプールを比較したものである。Aコースのシュプールがもっとも浅い。



A: 踏みかため雪面
B: スノーセメント散布面
C: 塩化カルシウム散布面

第21図 A, B, C 3コースのシュプールの比較

薬剤を散布した湿雪面の硬度は、スノーセメントでも、塩化カルシウムでも、散布量が 100 g/m^2 の程度では、増加するとはいえなかった。しかし、第1回の散布約4時間後に、同じ雪面に 100 g/m^2 の割合で追加散布したときには硬度が50~60%増加した。一方、薬剤で処理した雪面のスキーに対する動摩擦抵抗 μ_k の値は、無処理の雪面での値よりもつねに大きかった。したがって、スキーに対する滑走抵抗という立場からいえば、つぼ足で踏みかため、スキーで平らにならした雪面が、薬剤処理の雪面よりもすべりやすいといえる。

この研究の一部は札幌オリンピック組織委員会から提供された研究費でまかなわれた。この研究に協力された日本楽器製造株式会社スポーツ用品部研究課栗原秀行氏、スキーの試走者太田芳一、極意憲雄の両氏、科学技術庁防災研究センター八木鶴平氏、北大理学部大学院学生河村俊行君に感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 黒岩大助・他 1968 下藤野リージュコース、北の峯アルペン競技コース及び大雪山アイスバーンの雪質調査. 低温科学, 物理篇, **26**, 249-267.
- 2) 藤岡敏夫 1958 雪櫃の抵抗 IV (積雪と板との平面摩擦 2). 低温科学, 物理篇, **17**, 31-49.
- 3) 藤岡敏夫 1954 スキーを前へおしすすめる足の力. 低温科学, 物理篇, **12**, 37-49.
- 4) 棚橋良次 未発表.
- 5) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.

Summary

The coefficient of sliding friction of snow, μ_k , for skis was measured in a range of speed of 5 to 21 m/s at the Togakushi ski area, using a sensitive electronic apparatus. The purpose of this study is to find the ideal condition of snow for XI Olympic Winter Games in Sapporo. Three test courses, A, B and C were prepared as seen in Fig. 17. The surface of A course was hardened by compression by feet by several people and smoothed by skis (Fig. 10). The surfaces of B and C courses were hardened by spraying "snow cement" and powdered calcium chloride at a rate of 100 g/m², respectively. In our experiments, the value of μ_k of A course was found to be smaller than that of B or C course. Hardness, free water content, density, and microscopic structure of snow texture were observed simultaneously.