HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪橇の抵抗　III.　模型橇の抵抗
Author(s)	藤岡, 敏夫; 木下, 誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 14, 43-54
Issue Date	1955-12-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17897
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p43-54.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tosio HUZIOKA and Seiiti KINOSITA 1955 Studies on the Resistance of Snow Sledge III. Friction between Snow and a Model Sledge. *Low Temperature Science, Ser. A, 14.* (With English résumé p. 52)

雪橇の抵抗 III.

(模型橇の抵抗)*

藤岡敏夫　木下誠一

(低温科学研究所　応用物理学部門)

(昭和30年10月受理)

I. はしがき

橇をひいて雪の上をすすむ時，橇が雪からうける抵抗については，実用上の問題とも関連して，多くの研究が実験的になされている。又橇と雪との間におこる摩擦の機構については，Bowden[1] の摩擦熱に基礎をおく研究がしられている。しかし，積雪の性質が複雑なために，実験も理論もまだ十分な発展をみるまでにいたつていない。

橇が通りすぎると，雪には橇のすべりあとがしるされている。このすべりあとは，積雪が橇によつて，間歇的に破壊，圧縮されて生じたものである。このために，橇を一定の速さですすませていても，橇のうける抵抗は一様なものではない[2),3)]。

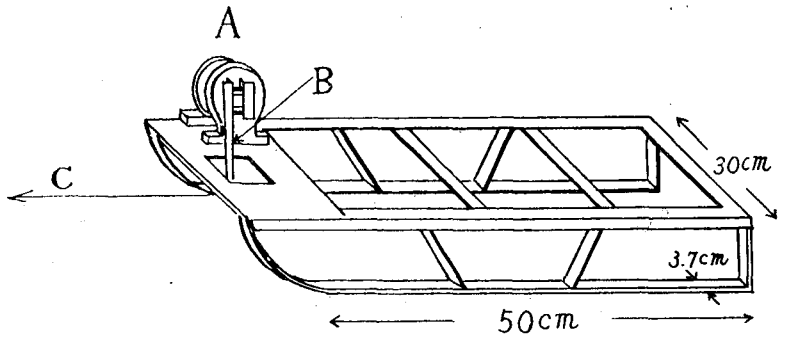
筆者等は鉄製の小型の橇をつくり，この橇が雪からうける抵抗力を，磁歪計をもちい，電磁オッシログラフによつて記録した。抵抗力の測定は，普通，スプリングを応用した計器によることが多い。しかし，スプリングは力に対する変形が大きいことのため，また，それをふくむ測定器の固有振動週期が長いため，抵抗力のこまかい変動を測定するのには不適当である。磁歪計は弾性係数が大きいので，以上の欠点がなく，抵抗力のこまかい時間的変化の様子をしるのに適している。

以下に報告する実験は低温科学研究所の庭でおこなわれたものである。

II. 測定装置と測定方法

実験は第1図のような鉄製の橇を，綱で人がひつぱつておこなつた。橇がうける抵抗力は綱が橇をひく力にひとしい。したがつて綱と橇とのあいだの力をはかれば橇の抵抗がえられるわけである。第1図の **A** は磁歪計で，橇の前の部分に固定され，その中心の鉄心に鉄の腕 **B** が下向けにとりつけてある。**B** の下端にむすんだ丈夫な紐 **C** をひつぱつて橇をうごかすと，

* 北海道大学低温科学研究所業績　第295号



第1圖　測定裝置

綱の牽引力が磁歪計 **A** にかかつて，牽引力に比例して変化する電流がえられる。この電流を増幅し，電磁オッシログラフにみちびいて記録した。磁歪計は著者等の一人藤岡が鉄板と雪との平面摩擦の測定につかつたものと同型である[4]。オッシログラフの振動子には H 型振動子をつかつた。

第1図の橇は1吋のアングルで骨組をくみ，滑走部には，幅 3.7 cm の帯鉄をつかつた。先の彎曲部の曲率半径は 20 cm，滑走部の水平部分の長さは 50 cm で，滑走部の底面積は両側あわせて 370 cm^2 である。橇の目方は 10 kg で，さらに 104 kg までの荷重を追加するようにした。したがつて，雪面におよぼす静圧力は 27～310 gr-wt/cm^2 であつた。

橇を雪の上に放置しておくと，凍りつきの効果があらわれるので，いつも，引きだすまえに，あらかじめ橇を雪の上でゆすぶつてからひつぱることにした。綱をひくと，橇は 0.1～1.2 sec 位でうごきだす。2～5 m の距離を大体一様な速度 (50～80 cm/sec) でひいた。

III. 測定結果

オッシログラムからもとめた静止摩擦係数，平均運動摩擦係数を，実験時の条件とともに便宜上，まえもつて，ここに表でしめしておく。これについての説明は第 IV 節以下にみることができる。第1表は，ふみかためた雪の上でおこなつた測定結果で，ふみかためる前の雪質

第1表　ふみかためた雪の実験

月日	雪質	気温 (°C)	雪温 (°C)	密度 (gr/cm^3)	硬度 (cm)	静止摩擦係数	運動摩擦係数	雪の表面の状態	記事
1. 28	しまり雪	−4.0	−4.0	0.44	8	0.2	0.12	かわく	
29	〃	−3.8	−3.5	0.40	6.5	0.25～0.4	0.17	〃	表面に新雪あり
30	〃	−1.2	−1.6	0.48	7.3	0.32～0.37	0.13	〃	
2. 3	〃	−3.4	−3.6	0.51	7.7	0.25	0.12	〃	
3	〃	−5.6	−4.8	0.55	7.0	0.35～0.5	0.17	〃	
3	〃	−6.2	−4.4	0.55	7.5			〃	表面に新雪あり

月日	雪質	気温 (℃)	雪温 (℃)	密度 (gr/cm³)	硬度 (cm)	静止摩擦係数	運動摩擦係数	雪の表面の状態	記事
2. 4	新雪	− 7.5	−6.4	0.40	7.8	0.4 ～0.45	0.19	かわく	
5	しまり雪	−13.4	−8.8	0.40	8.2	0.22～0.37	0.12	〃	
11	〃	− 2.1	0	0.59	7.5	0.3 ～0.4	0.18	ぬれる	
18	新雪	− 7.4	−4.2	0.37	8	0.3 ～0.5	0.19	かわく	
24	しまり雪	+ 4.2	0	0.67	7.5	0.2 ～0.4	0.18	しめる	
3. 11	新雪	+ 0.2	0	0.53	7.6	0.23～0.4	0.22	〃	

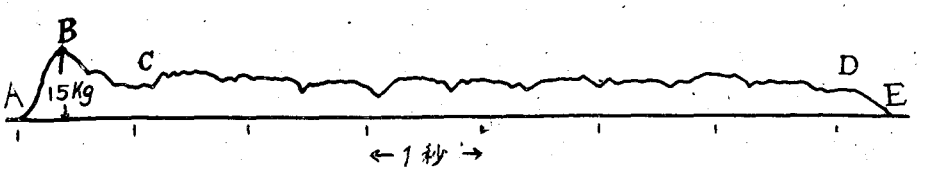
第 2 表 ふみかためない新雪中の実験

月日	気温 (℃)	雪温 (℃)	密度	硬度 (cm)	厚さ (cm)	埋れた深さ (cm)	雪の状態
2. 4	−7.5	−6.8	0.1	−2	20	15	かわく
2. 18	−4.2	−4.2	0.07	−4	25	20	〃
3. 11	+1.2	0	0.11	0	9	6	しめる

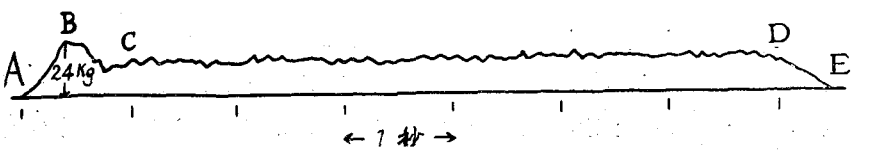
は新雪，しまり雪，しめりしまり雪である。第2表は，ふみかためない，つもつたままの新雪中で橇をひいた時のものである。

IV. 抵抗(牽引力)—— 時間曲線

オッシログラムの例を第2図，第3図にしめした。第2図はふみかためた雪面の上で橇をひつぱつた例で，第3図は新雪中を，橇の下の方が雪に埋れたままでひつぱつた例である。雪質その他の条件のちがいで，記録にも多少のちがいがあらわれてくるけれども，第2図のような形式は稀で，大体のところ，第3図とおなじ型の曲線がえられた。第2図のオッシログラムでは，0.6 sec ぐらいの週期のかなり規則正しい変動がみられるが，これは，ふみかためた雪の2, 3の例についてみられただけで，一般的なものではない。



第 2 圖 オッシログラム (ふみかためた雪)



第 3 圖 オッシログラム (ふみかためない新雪)

A 点で橇をひきはじめ，次第に力がまして B 点で最大になり，ここで橇はうごきはじめる。この時の力が最大静止摩擦抵抗に相当する（以下「最大」をはぶく）。B 点以後力がへつて C 点以後は大体一定の値になる。B 点から C 点までは，次第に橇の速さがましていつて，C 点以後は大体一定の速さになると考えられる。この速度は 50～80 cm/sec であつた。ただし，人がひつぱるのであるから，C 点以後の速度にも多少速度のむらがあると考えなければならない。C 点以後のほぼ一定な力は運動摩擦抵抗である。D 点で力をぬくと，橇は雪からうける抵抗のために自然にとまる。D 点で力が完全にぬけたとすれば，力は不連続的に 0 になるべきであるが，オッシログラムは，D 点以後，力がほぼ連続的に減じ，遂に E 点で 0 になることをしめしている。すなわち，μ, m, g をそれぞれ運動摩擦係数，橇の質量，重力加速度とすれば，力 f は $f=mg\mu(1-t/\tau)$ でしめされる。τ は D から E までの時間である。ところで，オッシログラムの上で力が 0 になつた E 点で橇がとまつたわけではない。しかし，橇の運動も E 点よりほんのすこしあとで停止していることが，つぎのような計算でしめされる。D と E との間の時間を τ とすると，D と E との間では，上記の牽引力のほかに $mg\mu$ なる抵抗力がはたらいているので，橇に関する運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{g\mu}{\tau}t$$

となり，このことから，E 点での橇の速度 v' は

$$v' = v_0 - \frac{1}{2}g\mu\tau$$

となる。v_0 は D 点での速度である。E 点以後は牽引力は 0 で運動摩擦だけになるので，橇は E 点をすぎて $\tau'=v'/g\mu$ だけ時間がたつととまるわけである。v' に上の値をいれると

$$\tau' = \tau_0 - \frac{1}{2}\tau$$

となる。ただし，τ_0 は $v_0/g\mu$ にひとしく，D 点で牽引力が完全に 0 になつたとした時，D 点から橇がとまる時までの時間である。v_0 は 50～80 cm/sec, μ は第 2 表の値をつかえば，大体 0.15 である。これらの値をもちいて計算すると，τ_0 は 1/2 sec か，1/3 sec である。また，τ は，第 2 図，第 3 図からみて 1/2 sec ぐらいである。したがつて，τ' は 1/4 sec ぐらいになるわけである。

橇がうごいている BCD の間では，平均抵抗力に抵抗力の変動が重畳している。これらの変動には，雪面のでこぼこ，ひつぱり方の不均一性のために生じたものが当然ふくまれている。しかし，雪面，荷重，ひつぱる速さをかえておこなつたいくつかの実験のどれにも，この抵抗力の変動があらわれるのであるから，力の変動は，上記の原因のほかに，雪面の抵抗それ自身の性質にも関連している事柄だと考えなければならない。一方，藤岡はスキーの抵抗の研究[2]の結果，スキーが雪からうける抵抗にもこまかい変動があらわれることをみ，それをスキーが雪を破壊圧縮するために生じたものであると解釈した。雪を破壊圧縮する際に間歇的な力

があらわれることは，積雪にゆつくり力をくわえて破壊をおこさせた吉田・藤岡の実験[5]や，急激に力をくわえて破壊をおこさせた木下の実験[6]においても認められる。また，木下の実験の理論的な解釈については吉田の報告[7]がある。したがつて，この橇が雪からうける抵抗にも橇が雪を破壊圧縮するために生じた抵抗の変動もふくまれていると考えられる。

この抵抗力の変動の週期は，0.05～0.6 sec で，橇のすすんだ距離に換算すると，4～24 cm になる。振幅はたかだか数 kg-wt のものであつた。

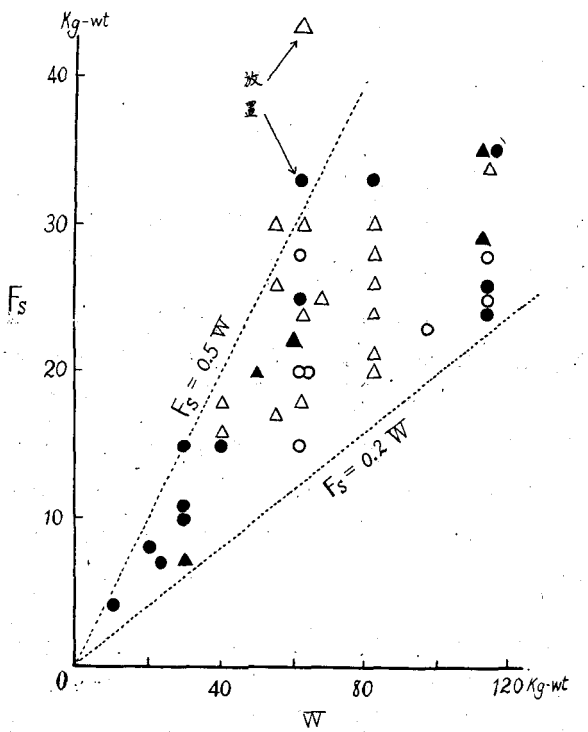
ここにえられた抵抗力の記録から，雪を破壊圧縮するために生じた部分だけを取りだすことは，このままでは困難である。雪質とどんな関係にあるかをしらべることなど，こんごの研究にまたなければならない。

V. ふみかためた雪面の静止摩擦

一般に静止摩擦抵抗は牽引力を次第にましていつて，橇がうごきだす瞬間の力の大きさであらわされる。この実験では，橇を雪の上でゆりうごかして，橇の滑走部と雪面との凍りつきをのぞいてから，ただちに力をくわえて橇をひつぱり，静止摩擦抵抗をもとめている。

まず，橇がうごきだす瞬間の力，第2図の **B** 点の力 F_s をとつて，橇の重さ W (橇の目方と荷重との和) とくらべてみる。F_s と W とが比例すれば，F_s/W を静止摩擦係数とすることができる。F_s と W とのグラフを第4図にしめす。第4図では，測定値を，新雪，しまり雪に分け，それらをさらに，かわいたもの，しめつたものとに区別して，別々な記号でしめしてある。雪質によつて橇のすべりぐあいがちごうことが日常経験されるように思われるので，実験がおこなわれた雪についてもこの4種類にわけてみたのである。湿つた雪は，第1表の雪の密度の値 (0.53, 0.59, 0.67) からも推定されるように，かなり含水率の多いものであつた。

しかし，第4図の測定値の分布からみると，雪質によるちがいはほとんどないといつてよい。また，同じ種類



第 4 圖 ふみかためた雪の静止摩擦抵抗，F_s と橇の全重量 W との関係

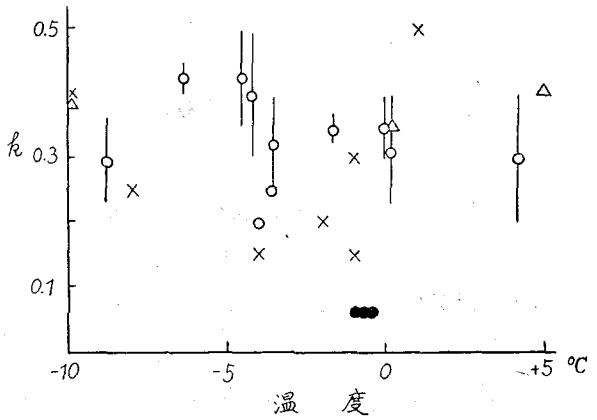
○ 乾きしまり雪　● ぬれしまり雪
△ かわき新雪　▲ ぬれ新雪

の雪についても，測定点は一直線上にのらず，かなりちらばつている。しかし，すべての値が $F_s=0.2\,W$ と $F_s=0.5\,W$ との2つの直線のあいだに分布しているので，ふみかためた雪の静止摩擦係数は0.2～0.5の範囲にあるということができるであろう。

VI. 温度とふみかためた雪の静止摩擦係数との關係

われわれの測定は，雪の温度としては−10°～0°Cの範囲内，気温としてはこれよりも少し温度の高い＋5°C迄の範囲についておこなわれた。第5図に温度（0°C以下は雪温，0°C以上は気温）と静止摩擦係数との関係を○印でしめしてあるが，これでみると，静止摩擦係数と温度との間には規則的な関係はみられない。

静止摩擦係数の測定には，ほかに鉄板ばりの橇をつかつたものとして，四手井・宮川[8]，Pavlov[9]のものがある。四手井・宮川がしまり雪についておこなつた測定では，−0.9°C −0.6°C，−0.7°Cの気温で，いずれも0.06の値がえられている。おなじくしまり雪について Pavlov がえた値は，気温 −4°C，−10°Cの時それぞれ0.40，0.15である。第5図には Pavlov，四手井・宮川の値もかきいれてあるが，われわれの測定値は，Pavlov の値にはかなり近いが，四手井・宮川の値とはひどくちがつている。



第5圖　温度と静止摩擦係数 k との関係，但し温度の0°C以下は雪温，0°C以上は気温

● 四手井・宮　川
○ 藤　岡・木　下　} 鉄　△ Bowden…アルミニウム
× Pavlov

Bowden は鉄についてではないが，アルミニウムについて測定している。その測定値を第5図に△でしめした。この値はわれわれの値とよく一致する。

橇を雪の上に放置すると，静止摩擦抵抗がますことがしられていて，普通“凍りつき”とよばれている。われわれの測定でも，四手井・宮川の測定でも，“凍りつき”がおこらないように，測定前に橇を雪の上でゆりうごかすことにしたのであるが，とくに橇を雪の上に40分間放置してから，ひつぱつた時の値を第4図に「放置」とかきそえてしめしてある。これからみられるように，40分間放置しておいても，それほどひどいちがいがあらわれるわけではない。なお，山脇[10]は，橇を1/6分から10分までの間，雪のうえに放置して，放置時間と静止摩擦係数との関係をしらべている。鉄板の橇では，1/6分で静止摩擦係数は0.076，1分で0.094，3分で0.105，10分で0.110となつている。ただし，この橇の接地圧は1.74 kg-wt/cm² で，四手井・宮川の場合の150 gr-wt/cm² まで，われわれの場合の27～310 gr-wt/cm² の値にくらべる

と，接地圧は1桁位も大きい。今簡単に，凍りつきは，放置時間がおなじでも，接地圧に比例してますと仮定すると，四手井・宮川の測定の場合と，われわれの場合とで，橇を雪の上でゆすぶつてからひきだすまでの放置時間のちがいが，たとえ3分間あつたとしても，そのために生ずる静止摩擦係数のちがいは0.01以下の小さい値である。したがつて，われわれの場合，凍りつきの影響があつたとしても，それは考えなくてもよいほど小さいであろう。

橇の滑走部の幅や，水平部分の面積のちがいによつて，静止摩擦係数がちがつてくることも考えられる。四手井・宮川の使用した橇の滑走部の幅は3 cm，水平部分の長さは60 cmで，われわれのものは，幅3.7 cm，水平部分の長さ50 cmであるから，幅も面積もわずかのちがいである。Pavlovのものは，はつきりした寸法はわからないが，写真でみると，大体われわれの橇位の寸法である。したがつて，上にのべた静止摩擦係数のちがいは橇の寸法によるものとは考えられない。

VII. 静止摩擦抵抗に及ぼす橇のひき方の影響

雪は弾性と粘性の2つの性質をもつ粘弾性物質であることが，吉田[7]，小島[11]によつて報告されている。したがつて，雪の変形や破壊には，力がくわえられている時間を考えにいれなければならない。四手井・宮川の実験では，橇と曳綱との間にスプリングをとりつけ，その伸びを目でよみとつて，力の大きさを測定した。力の増加してゆく有様を目でおつてゆくのであるから，力のくわえはじめから橇がうごきだすまでの時間はかなり長かつたであろう。測定値が3桁の数字になつていることから考えても，少なくとも5～10 sec程度の時間は必要であつたと思われる。

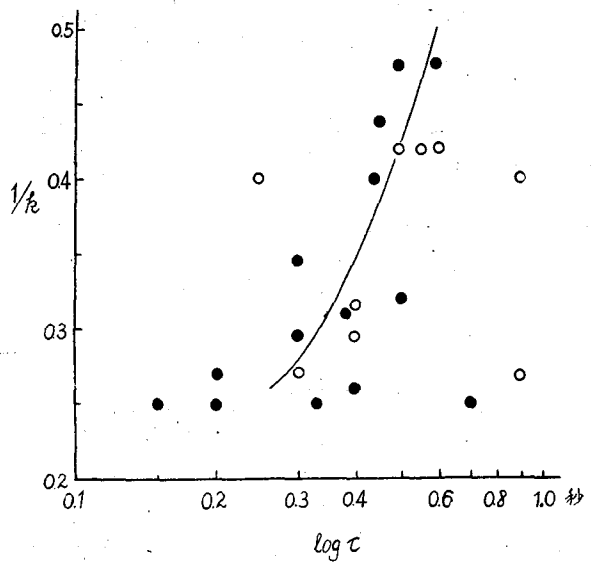
われわれの実験では，力は自動的に記録されるので，ゆつくりと力をましてゆく必要もなく，オッシログラムからもわかるように，力をくわえてから1 sec以内で橇はうごきだしている。Pavlovの測定装置も，スプリングを利用した自記記録式である。しかし，電気を利用したものではなく，すべて機械仕掛なので，力のかけかたが，四手井・宮川の場合よりは速いことは明らかであるが，われわれの場合よりはゆつくりしていたであろう。第5図をみると，四手井・宮川の値が一番小さく，われわれの値が一番大きく，Pavlovの値がこの中間をしめている。この順序から考えると，橇はゆつくりした力のくわえかたでは小さい力でうごきだし，力のくわえかたがはやくなると，大きな力が必要になるようにみえる。

力のくわえかたがはやくなると，静止摩擦係数がます現象は，2つの金属間の乾燥摩擦においてもみられることがらである[12]。この場合には，接触面のごくわずかの部分で金属同士の凝着がおこり，金属間のすべりがはじまるためには，凝着した部分の破壊がおこらなければならない。金属は粘弾性の性質をもつているので，力をくわえるはやさによつて，破壊のおこる確率も変化し，静止摩擦係数もかわるのだとされている。

BakerとPreston[13]は，ガラス及び陶器に力をくわえて破壊をおこさせ，破壊強度と力を

くわえた時間との関係をしらべている。その結果をまとめたGlathart と Preston[14]の報告によると，ガラスや陶器も粘弾性をしめす物質であつて，力をくわえる時間がながいと破壊強度は低下する。ある大きさの力 f で破壊がおこるためには，その力をある時間 τ だけくわえておく必要があるのであつて，f が小さいほど τ は長くなる。その関係は $1/f$ が $\log\tau$ に比例する関係であらわされる。

橇をひきだした時，橇の滑走面は単に雪の上をすべるだけでなく，その下の雪をひきずり，雪を破壊するであろう。したがつて，静止摩擦抵抗はこの雪の破壊に要する力によつて支配されるものと考えられ，その力は静止摩擦係数 k に比例するであろう。それでふみかためたしまり雪の測定の記録から，力をくわえてから橇がうごきだす迄の時間，すなわち第2図，第3図の **AB** 間の時間 τ と k との関係をしらべてみた，第6図は $\log\tau$ と $1/k$ との関係である。あきらかに時間 τ がながいと $1/k$ はまし，静止摩擦係数 k はへる。第6図の τ の範囲は1 sec 以下なので，$\tau=10$ sec まで拡張するのはすこし乱棒なことになるが，かりにそれが許されたとすると，k の値として0.1以下の値が期待される。このようにして，四手井・宮川が k の値として0.1以下をえたのは，τ が長かつたためであると説明しうるように思われる。

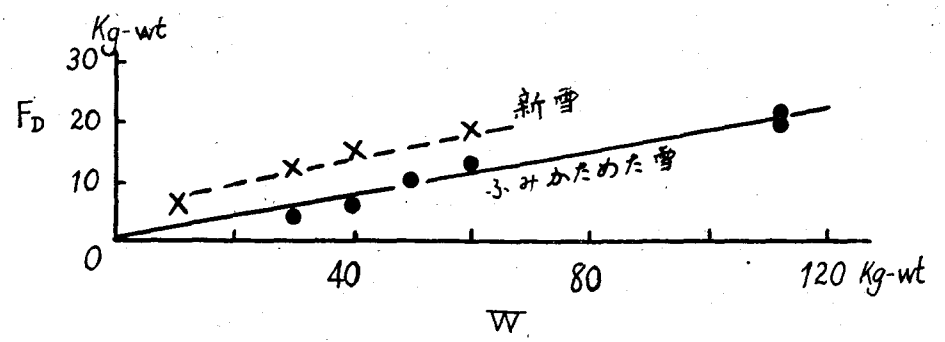


第6圖　力を加えてから橇が動きだすまでの時間 τ と静止摩擦係数の逆数 $1/k$ との関係
ふみかためた雪　○ 乾雪，● 濕り雪

VIII. ふみかためた雪の運動摩擦係数

第2図，第3図にみられるように，運動摩擦抵抗の記録の曲線にはこまかい変動もふくまれているが，抵抗の大体の平均値をとつて計算した運動摩擦係数が第1表にかかげてある。一例として，3月11日について，運動摩擦抵抗と荷重との関係を第7図に実線でしめした。測定値は大体原点を通る直線上に分布し，直線のかたむきから運動摩擦係数をもとめると，0.22である。他の測定においても，大体直線上に分布する測定値がえられている。静止摩擦の場合には，雪質のちがいと摩擦係数との間には，はつきりした関係がみとめられなかつたが，運動摩擦係数のばあいには，つぎの2行にしめすように，雪質と，摩擦係数との関係はかなり規則的である。

乾いた雪（しまり雪：　0.12，　新雪：　0.17～0.19）



第 7 圖　運動摩擦抵抗 F_D と橇の全重量 W との関係

湿つた雪（しまり雪：　0.18　新雪：　0.22)

しまり雪，新雪はいずれもふみかためてある。乾いた雪，湿つた雪のそれぞれの雪についてみれば，ふみかためた新雪よりも，ふみかためたしまり雪の方が摩擦係数は小さく，しまり雪，新雪のいずれも，乾いた雪よりも湿つた雪の方が運動摩擦係数は大きい。雪がしめると運動摩擦係数が大きくなるという結果は，藤岡・疋田がおこなつた鉄板と雪との運動摩擦の研究[4]においてもみられている。

IX. 新雪中の運動摩擦係數

ふり積つたままで，ふみかためない新雪の場合は，静止摩擦抵抗も運動摩擦抵抗もともにふみかため新雪の場合よりも大きくなつている。これは橇が新雪の中にうずもれてすすむために，ふみかためた雪の場合よりも，少なくとも橇の頭部および側面のうける抵抗がましたためと考えられる。しかし，まえにものべたように，オッシログラムにあらわれる牽引力のこまかい変化の有様は，ふみかためた雪のばあいとかわらない。

第7図には，ふみかためた新雪についてのものといつしよに，ふみかためない新雪についての測定結果が×印と破線とでしめしてある。この測定のときは，橇のすべりあとの溝の深さは約6 cm であつた。第7図の測定値は大体直線上に分布していて，ふみかためた場合の実線と平行になり，全体として，抵抗が7 kg-wt ほど大きくなつている。橇の滑走部の水平部分と雪との間の摩擦抵抗が，新雪をふみかためた時とふみかためない時とでかわらないと仮定すると，この7 kg-wt の抵抗の増加分は，橇の頭部および側面による抵抗になる。

橇の頭部が雪からうける抵抗は，橇がすすむにつれて，雪を破壊圧縮するために，雪からうける抵抗力であると考えられる[15]。この分の抵抗を f kg-wt とすると，橇が a cm すすむあいだに，橇の頭部がなした仕事は fa kg-wt·cm である。この仕事の結果として，深さ 6 cm，幅は橇の両側の滑走部合せて 7.4 cm，長さ a cm の溝がつくられたことになる。雪の密度は 0.11 gr/cm^3 であつたので，圧縮された雪の量は 6 cm×7.4 cm×0.11 gr/cm^3×a cm=5a gr となる。すなわち，fa kg-wt·cm の仕事で，5a gr の雪が圧縮されて溝ができたことになる。木

下[6]によると，密度 0.15 gr/cm³ の新雪の上におもりをおとすと，1 kg-wt·cm の衝撃エネルギーで，雪には1 gr の雪が占める大きさの体積とおなじ体積の凹みができる。したがつて，5a gr の雪が圧縮されて，溝の形の凹みをつくるためには，5a kg-wt·cm の仕事が必要となる。この仕事は，橇の頭部のおこなう仕事 fa kg-wt·cm にひとしいはずであるから，f，すなわち，橇の頭部の抵抗は5 kg-wt になる。第7図から，頭部および側面の抵抗をくわえあわせたものが7 kg-wt と結論したが，もしも，これらの値が正しいものとすれば，側面が雪からうけた抵抗は2 kg-wt となり，頭部の抵抗にくらべて小さいことになる。

おわりに，この研究に際し御指導下さつた吉田順五教授，御協力下さつた低温科学研究所応用物理部門の方々に感謝の意を表す。なおこの研究は文部省科学研究費によつておこなわれたものである。

文　献

1) Bowden, F. P. and D. Tabor 1950 The Friction and Lubrication of Solids. p. 65.
2) 藤岡敏夫 1954 スキーの研究 I. 低温科学, 物理篇, ***12***, 37.
3) 吉田順五 1954 スキーの研究 II. 低温科学, 物理篇, ***12***, 51.
4) 藤岡敏夫・疋田裕 1954 雪橇の研究 II. 低温科学, 物理篇, ***13***, 37.
5) 吉田順五・藤岡敏夫 1950 積雪がものを支える力. 低温科学, ***3***, 109.
6) 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.
7) 吉田順五 1953 積雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, ***10***, 1.
8) 四手井綱英・宮川信一 1951 雪ぞりの静摩擦抵抗に関する二, 三の模型実験. 雪氷, ***12***, 128.
9) Veinberg, B. P. 1940 Lëd (Ice) pp. 469-500.
10) 山脇三平 1953 模型橇による走行抵抗試験装置および予備実験. 林業試験所報告, No. 65, 127.
11) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, 物理篇, ***13***, 1.
12) 菅田宗範 1955 摩擦現象. 日本物理学会誌, ***10***, 1.
13) Baker, T. D. and F. W. Preston 1946 Fatigue of Glass under Static Loads. Jour. Appl. Phys., ***17***, 170.
14) Glathart, J. L. and F. W. Preston 1946 The Fatigue Modulus of Glass. Jour. Appl. Phys., ***17***, 189.
15) 黒田正夫 1942 橇の抵抗に関する研究 (1), (2). 雪氷, ***4***, 196, 229.

Résumé

A model sledge was caused to slide on the snow cover by means of a rope pulled by a man, and the drag force acting between the rope and the sledge was registered by an electrical recording device as shown in Fig. 1. The force was converted by the use of magneto-striction phenomenon to electric current which was recorded by means of an electro-magnetic oscillograph. The frame of the sledge and its runners were made of iron; the static pressure exerted by the runners on the snow cover was varied from 27 to 310 gr-wt/cm² by loading the sledge with various weights. Experiments were made on two sorts of snow cover: the one being soft fresh snow and the other being hard snow made by packing under foot fresh or compact snow. Examples of records of the drag force are shown in Fig. 2 (for hard snow) and Fig. 3 (for fresh snow). The man began to pull the rope at point **A** and the sledge started to move at point **B**. The

sledge proceeded with a constant speed from point **C** to point **D** by being pulled by nearly constant drag force. Even at point **E** when the drag force had vanished completely the sledge was still moving to be stopped some fractions of a second later. The peak of the drag force at point **B** must be the force of resistance due to static friction and the force appearing in the interval between **C** and **D** is the force of resistance due to kinetic friction. Although the kinetic friction shows small fluctuations as indicated in Figs. 2 and 3, discussion on them will be postponed to the future and here only the averaged mean value of kinetic friction will be considered. In Table 1 are listed the coefficients of static friction and those of mean kinetic friction of hard snow.

(1) Static Friction

Fig. 4 shows the relation between the total weight W of the sledge and the static resistance F_s in the case of hard snow. From this figure it can be seen that the coefficient of static friction lies between the values 0.2 and 0.5. The dependency of the static friction F_s upon the temperature is shown in Fig. 5, in which the temperature below 0°C is snow temperature and that above 0°C is that of open air. The light circles indicate the results of the present writers' experiment, the dark ones those of Shidei and Miyagawa, the crosses those of Pavlov and the triangles those of Bowden. The sledges used by Shidei and Miyagawa and by Pavlov had runners plated with iron, and the one used by Bowden had alminium runners. It seems that there is no definite relation between the static friction and the temperature. But definite differences are found between the results of different researchers, namely, the values obtained by the present authors are the largest and those by Shidei and Miyagawa the smallest while those by Pavlov lie between the two. Then it is likely that these differences found between the various researchers' results have their origin in differences in the experimental methods employed. Indeed, Shidei and Miyagawa determined F_s by observing by eye the maximum elongation of a spring inserted between the rope and the sledge. The time τ during which the pulling force must have been applied before the sledge began to move should have amounted to at least several seconds. In Pavlov's case it is expected that τ was reduced, since he used an automatic recording device to measure the force of resistance. But his device was a mechanical one and τ in this case would have been longer than that in the present authors' case where an electrical registering device was used. Now the static frictional force F_s can be considered to be the force needed for breaking down the snow lying directly in front of and below the sledge and it is known that smaller force is sufficient to break down a visco-elastic matter such as snow when longer time is allowed for the application of the force. Even in the case of metals, when no lubricant is used, the static friction is known to reduced if the force is applied slowly. Baker and Preston experimented on glass and porcelain and found that the inverse of their break-down strength is in proportion to the logarithm of the time of application of the force. In Fig. 6 the inverse of the coefficient k of the static friction of snow determined by the present authors is plotted against log τ, τ being the time interval between points **A** and **B** of the oscillograms of which Fig. 2 and Fig. 3 are two examples. Although no definite relationship can be found between $(1/k)$ and log τ, $(1/k)$ does show a tendency to increase as log τ increases.

(2) Kinetic Friction

The resistance F_D due to the kinetic friction is proportional to the total weight W of the sledge in the case of stamped fresh snow as shown by the dots and the full line of Fig. 7. In the case of non-stamped fresh snow the relation between F_D and W is represented in Fig. 7 by the broken line which lies parallel to and about 7 kg-wt above

the full line. This increase ΔF_D in F_D in the case of fresh snow is probably attributable to the additional force which is needed for the frontal curved parts of the runners to break down the deep fresh snow lying in front of them. Additional energy required to overcome this additive force ΔF_D while the sledge transversed a given distance was found to coincide in magnitude with the product $V \times w$, where V is the volume of fresh snow broken down and compressed by the sledge and w is the energy, which one of the present authors determined experimentally, is needed to break down a unit volume of fresh snow.