



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪橇の抵抗 II. : 積雪と鉄の板との摩擦 (2)
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio; 疋田, 裕 他
Citation	低温科学. 物理篇, 13, 37-47
Issue Date	1954-12-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17888">https://hdl.handle.net/2115/17888</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	13_p37-47.pdf



## 雪 橇 の 抵 抗 II.

### 積雪と鐵の板との摩擦 (1)\*

藤岡敏夫 疋田 裕

(低温科學研究所 應用物理學部門)

(昭和29年12月受理)

### I. 緒 言

積雪と金属あるいは木材の板との間の摩擦は、雪橇やスキーの抵抗と関連して、しばしば研究されてきた。普通行われている実験では、実物の橇あるいは模型の橇をつかい、これらの橇を積雪の上で曳いてゆく時にあらわれる抵抗を測定する方法がとられている。橇の抵抗は大体において2つの部分からなるものと考えられている。第1は橇の弯曲した頭部でおこる抵抗で、これは橇がその前の雪を押しわけ、押しつぶすために生ずる抵抗である。第2は橇の底面が雪の上を滑る時に生ずる摩擦抵抗である。上記のような実験方法では、これらの2つの抵抗を同時に測定することになり、各々の抵抗の値を別々にすることは出来ない。筆者等の1人はすでに第1の橇の頭部の抵抗についてある程度の研究を行つたが<sup>1)</sup>、ここに、第2の、橇の底面の抵抗に関する研究結果を報告する。

どんな形の橇をつかうにしろ、直線形の橇には端があるので、端のために生ずる抵抗があらわれる。したがつて、橇の底面の抵抗だけを測定するためには直線形の橇をつかうことはできない。筆者等は鉄板を円い輪に切りとり、これを廻転する雪の上においた。雪が廻転すると雪と鉄の輪との間に生ずる摩擦抵抗のために、鉄の輪には廻転モメントがくわり、そのモメントを測れば摩擦抵抗がえられる。この場合明らかに鉄の輪は端のない橇とみてよいわけである。木材を輪にして同様の実験を行う準備もしているが、この報告は、鉄の輪についての実験結果のみにとどめる。

### II. 測 定

第1図は測定装置である。Aが鉄の輪で、この輪と、廻転板にのせたブリキ製の籠Bに入れた雪との間の摩擦抵抗をはかるようになっていゝ。鉄の輪Aには、輪の直径にそつて鉄の板Cがとりつけてあり、板Cの真中に鉄の棒Dが垂直に固定されている。棒Dの上部は

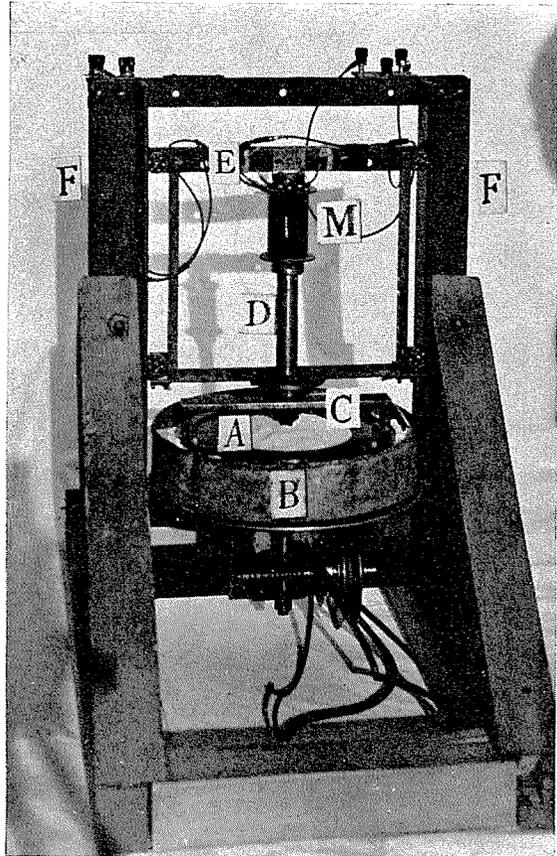
\* 北海道大學低温科學研究所業績 第276號

磁歪計  $M$  を形作り、その上端は鉄で作った四角な棒  $E$  に固定されている。 $D$  は、また、その下端近くで、ボールベアリングを介して棒  $E$  の下辺にとりつけてある。鉄の棒  $E$  の四隅には車がつけてあつて、この車はアングルで作った左右の柱  $F$  に切つてある溝にそつて動き、棒やこれにとりつけてある棒  $D$ 、鉄の輪  $A$  は全部一緒に自由に上下に動くことができる。雪を入れる罐  $B$  をのせた廻転板はウォームギヤをへて8分の1馬力のモーターで駆動される。

棒  $E$  を下げて鉄の輪  $A$  を雪にのせ、モーターを始動して雪を廻転させると、雪と鉄の輪との間には摩擦抵抗があらわれ、棒  $D$  は振りのモーメント  $m$  をうける。この振りのモーメントを測定する装置として振り磁歪計  $M$  がつかわれる。振り磁歪計の特徴は振りのモーメントが電氣量としてえられること

及び振りの変位が小さいことである。振り磁歪計の詳しい研究はすでに発表されている<sup>2)</sup>ので、ここでは簡単に説明する。

棒  $D$  の上部、 $M$  の部分は中空の管になつている。この管の壁の1つの側に上下約4 cm へだてて一対の窓があり、その窓をとおし、管壁をうちそとからはさむようにコイルが捲いてある。管の反対側にも同じように一対の窓をあけてコイルがまいてあつて、2つのコイルは直列に接続され、両端は導線によつて外にみちびかれている。この2つのコイルは搜索線輪とよばれている。搜索線輪の上に、管をとりまいて第2のコイルがまいてある。第2のコイルは管を軸方向に磁化するためにまいたコイルで、励磁線輪とよばれている。励磁線輪に直流電流を通して、管を軸方向に磁化し、管に振りのモーメントをくわえると、管の壁には管の軸に垂直な面内で円周方向に磁束が誘起される。この磁束は搜索線輪をつらぬいて流れ、磁束密度は振りのモーメントの大きさに比例する。したがつて搜索線輪に電流計をつないでおくと、振りのモーメントの時間的变化に比例したフレが電流計にあらわれる。この方法では、振りのモーメントの時間的变化しかはかれないが、励磁線輪に交流電流を通し、管を交番磁化すると、振りのモメ



第1圖 測定装置

ントを一定に保つておいても搜索線輪には励磁電流と同じ周波数の交流の出力がえられる。この出力の振幅はくわえたモメントの大きさ  $m$  に比例する。したがつて、検定によつて、その比例常数を定めておけば出力電流の測定から、振りのモメントの値が知られる。

鉄の輪の上の一点、中心からの距離  $r_0$  のところにスプリングバランスをとりつけ、その点を通る直径に垂直に水平方向に力  $F$  を加えれば、鉄の輪には値の知られた  $r_0 F$  なる廻転モメントがかかる。したがつて、このような簡単な方法で、この比例常数はきめることができる。ただ、いまのばあい、目的とするところは、雪の摩擦力によつて生ずる振りのモメント  $m$  の測定ではなく、摩擦力そのものの測定であるから、摩擦力と  $m$  との関係を知つておく必要がある。第 1 近似としては、摩擦力は鉄の輪全体にわたつて一様と考えられるので、鉄と雪との接触面の単位面積あたりの摩擦力を  $f$  とすれば、内径外径  $r_1, r_2$  の輪については

$$m = 2\pi f \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr = \frac{2\pi}{3} f (r_2^3 - r_1^3)$$

となる。したがつて、全摩擦力  $F$  は

$$F = \pi f (r_2^2 - r_1^2) = \frac{3m}{2} \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^3 - r_1^3}$$

で与えられる。

棒  $D$  (第 1 図) は軟鉄なので磁歪管もまた軟鉄である。旋盤加工のために管には振りの永久歪がこつたが、測定にはさしかえがなかつたので、焼きなましをしないでそのままつた。ただ軟鉄は磁歪材料としてはすぐれた材料でないために、搜索線輪にえられる出力も小さい。それで出力電流は計器用整流器のついた電流感度の高い検流計でよみとることにした。

鉄の輪  $A$  の外径は 20 cm, 内径は 16 cm である (第 1 図のものはその後の実験に使用している外径 20 cm, 内径 12 cm のものである)。摩擦面は旋盤で削つた後サンドペーパーで磨いた。仕上げのサンドペーパーとしては 240 番のものをつかつた。

棒  $E$  と、それにとりつけられて上下に動く測定部分との全体の重さは 1.7 kg である。したがつて、輪が雪におよぼす圧力は平均して 15 g-wt/cm<sup>2</sup> となる。スキーに人がのつた場合、雪に与える静圧力の平均は、人の体重を 60 kg, スキーの長さを 2 m, 幅を 7 cm として約 21 g-wt/cm<sup>2</sup> である。又普通の馬橇の滑走面の長さは約 2 m, 幅は 7 cm 位であるから、1 トンの荷物がのせられているとして 360 g-wt/cm<sup>2</sup> の圧力を雪におよぼしていることになる。それで、雪に加える圧力をますために 20 kg までの重りを棒  $E$  の下の横板、すなわち、ボールベアリングをとりつけてある板にのせた。20 kg の重りにすると雪には 177 g-wt/cm<sup>2</sup> の圧力がかかる。

測定はすべて低温室 (−30°~−20°C) でおこなつた。また、つかつた雪はみなしまり雪である。第 1 図の装置全体を低温室内にもうけた恒温箱におさめ、6 通りの温度、−24°~−22°C, −9°C, −4°~−3°C, −1°~0°C, 0°~+1°C, +3°~+4°C で測定した。1 回毎の測定については、温度は ±0.5°C 以内で一定に保たれるようになってい。又始終ファンをまわして、箱の

中の空気を循環させ、場所による温度のちがいがないようにした。

磁歪計の特性は温度によつて多少変化する。磁歪計の温度は、気温の変化によつてはもとよりのこと、磁気履歴損失、渦電流損失のためにもかわるであろう。しかし、実験的にたしかめた所では、 $-24^{\circ}\sim+4^{\circ}\text{C}$ の範囲では、特性の変化はほとんど認められなかつた。

### III. 測定結果

Leonard da Vinci によつて発見され、Amontons によつて再発見された所謂 Amontons の法則によると、摩擦抵抗の大きさは荷重の大きさに正比例し、接触面の大小には無関係である。また、Coulomb は摩擦抵抗は摩擦速度に無関係であるとのべている。我々の測定につかつた雪はしまり雪であるが、しまり雪と鉄との摩擦は、だいたい第2図に示したような4つの型に分類することができる。(1)型は荷重と抵抗との間に直線関係がなりたつもの、(2)型は荷重が大きくなるにつれ、抵抗のまし方が大きくなるもの、(3)型は始めのうちは荷重と抵抗との間には直線関係がなりたつが、ある程度荷重がますと、それ以後は抵抗がかからなくなつてしまつてもうもの、(4)型は大體直線関係がなりたつが、荷重の大きいところでは時々摩擦抵抗がゆつくり変動するものである。(4)型の図の中にかき入れてある矢印はその変化の方向をしめしている。(4)型の例にあげてあるものは直線の上の方で変動した場合であるが、直線の下側で変動する場合もある。

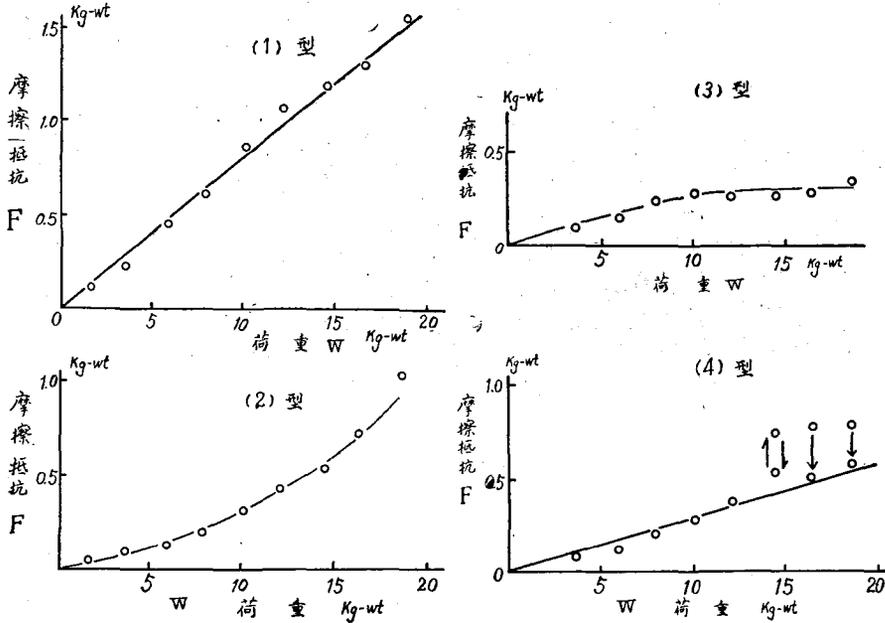
第1表に温度、摩擦速度、雪の粒子の状態をかえておこなつた摩擦係数の測定結果をかかげてある。(1)型のように、荷重と摩擦抵抗との間に直線関係がなりたつものは、摩擦係数と

第1表 摩擦係数と気温、

気温	$-24^{\circ}\text{C}\sim-22^{\circ}\text{C}$			$-9^{\circ}\text{C}$			$-4^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$			$-1^{\circ}\text{C}$
	速									
雪の種類	0.6	1.8	38	0.6	1.8	38	0.6	1.8	38	0.6
(I)	—	0.073	—	—	—	—	—	—	—	—
(II)	—	0.078	—	—	—	—	—	—	—	—
(III)	—	0.075	—	0.032	0.041	0.038*	0.028	0.018	0.021	—
(IV)	—	0.080	—	0.035	0.035	0.036*	—	0.024	0.032	—
(V)	—	0.067	—	—	0.031	0.028	0.039	0.019	0.020	0.015 <sup>+</sup>
(VI)	—	0.076	—	0.035	0.035	0.032	0.037	{0.021}	{0.027}	0.024
(VII) { 甲	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(VII) { 乙	—	0.081	0.059*	0.034	0.059	0.050	—	0.022	0.020	0.017
(VIII)	—	0.081	0.064*	—	—	—	—	—	—	—
(IX)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.017
(X) 氷	—	0.072	0.045	—	0.032	0.025	0.033	—	—	0.017
平均	—	0.076	0.056	0.034	0.039	0.035	0.035	0.021	0.023	0.018

\* (2)型 + (3)型 × (4)型 (第2図参照)

して抵抗と荷重との比を用いることができるが、(2), (3), (4)の型のばあいには、一定の摩擦係数というものはない。それで便宜上次のようにした。(2)の型のもの、その曲線の全体になるべく一致するような直線を考えて(1)型にひきなおし摩擦係数を算出した。表のうち、\*の印をつけてあるのは、こうしてきめたものである。この印のついたものは、摩擦速度がはやく、



第 2 圖 荷重—摩擦抵抗の關係

速度, 雪質との關係

~0°C		0°C~+1°C			+3°C~+4°C			密度 (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 (cm)	粒子の大きさ (mm)
度 (cm/sec)		度 (cm/sec)			度 (cm/sec)					
1.8	38	0.6	1.8	38	0.6	1.8	38			
—	—	—	—	—	—	—	—	0.47	—	1.0~1.5
—	—	—	—	—	—	—	—	0.48	—	1.0~1.5
0.017	0.029 <sup>x</sup>	—	0.021	0.032 <sup>x</sup>	—	0.046	—	0.36	7.9	1.0~1.5
—	—	—	—	—	—	—	—	0.35	7.9	0.2~0.3
0.017	0.031 <sup>*</sup>	0.018	0.022	0.028	0.047	0.059	0.030	0.52~0.54	9.4	1.0~2.0 3.0以上少数
—	—	0.038	—	—	0.107	—	—	0.49~0.50	7.7	1.0~1.5
0.021	0.029 <sup>x</sup>	—	0.024	0.035 <sup>x</sup>	—	0.069	0.027	0.45	8.4	1.0~3.0
0.017	0.016 <sup>*</sup>	0.020 <sup>+</sup>	0.018	0.020	0.068	0.040	0.020	0.46	8.6	5.0~8.0所々 2.0~3.0
—	—	—	—	—	—	—	—	0.39	—	4.0以上稀
—	—	0.017 <sup>+</sup>	—	—	—	—	—	0.35	7.1	1.5~2.5
0.019	0.016 <sup>+</sup>	0.021	0.021	0.015	0.016 <sup>+</sup>	0.017	0.017	—	—	—
0.018	0.027	0.024	0.021	0.029	0.074	0.054	0.026	—	—	—

温度が $0^{\circ}\text{C}$ 以下の時におこっている。(3)型は荷重がある程度大きくなると、それ以上荷重をましても摩擦力がかわらないものであるが、これについては、荷重の小さい範囲での直線部分をつかつて摩擦係数をきめた。これには+の印をつけてある。このような傾向のみられるのは摩擦速度が $0.6\text{ cm/sec}$ という小さい値のときだけである。(4)型は多数の測定値が直線上にあるが、いくつかの値だけが測定中にゆつくり変動したものである。これは直線上にある測定値に関して摩擦係数を定め、それには×の印をつけておいた。この種のもは速度が $38\text{ cm/sec}$ のはやい速度で、温度も高い方に多くあらわれている。同じ速度でも温度が低くなると\*のついた(2)型が多くなるのであるから、×の印のついた(4)型の1部は(1)型と(2)型との中間になるものかも知れない。

表のなかの温度は恒温箱の中の気温である。雪を罐に入れて恒温箱内の廻転板の上におき1~2時間後に測定を行つたから、この温度は雪自身の温度と考へてさしつかえない。ただ、気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以上の場合、雪の温度は勿論 $0^{\circ}\text{C}$ で雪はとけつつある。しかし、測定をはじめまでの時間を大体一定にしてあるために、気温は雪のしめり具合をあらわすことになる。 $+1^{\circ}\text{C}$ の気温ではややしめつている程度、 $+3^{\circ}\sim+4^{\circ}\text{C}$ では一面に濡れてぬれしまり雪になつている。但し罐をかたむけても、水が流れるようなことはない。

摩擦速度は輪の半径 $9\text{ cm}$ の所の線速度である。 $1.8\text{ cm/sec}$ と $38\text{ cm/sec}$ の速度のときはモーターをつかつたが、 $0.6\text{ cm/sec}$ のときはモーターとウォームギヤとの間にあるベルトを外し、ギヤ側のプーレーを手で廻した。

実験に使用した雪は低温室に保存しておいた3種類のしまり雪及びこれらの雪に手を加えて、雪の粒子の状態をかえたものである。保存されている3種類のしまり雪は、(A)前年来保存されているしまり雪。(B)その年の3月にとり入れた新雪で、保存中にしまり雪に変化したもの、(C)3月にとり入れたしまり雪とである。粒子の大きさは、(A)が $1.0\sim 1.5\text{ mm}$ 、(B)は $0.2\sim 0.3\text{ mm}$ 、(C)は $1.0\sim 3.0\text{ mm}$ であつた。第1表の《雪の種類》の行に示したのは、次のようなものである。

- I. しまり雪を罐に入れ、長期間低温室に放置したもの。非常に硬い。放置期間は約1箇月。
- II. Iの雪をそのまま $+10^{\circ}\text{C}$ の部屋に約20分間おき、その後低温室に入れたもの。表面より約 $1\text{ cm}$ の深さまでしめつた後に凍りついた。
- III. (A)の雪をくだかないで、そのまま罐に入れたもの。
- IV. (B)の雪を低温室内でくだき、罐に入れ、手でおしつけて1日低温室に放置したもの。1日間の放置で積雪粒子間の一度くだかれた結合は再びつながり合う。ただし、以前よりは結合の仕方がよわい。
- V. (A)の雪をくだいて罐に入れ、 $+10^{\circ}\text{C}$ の部屋にもちだしてかきまぜる。約20分たつて雪全体がしめつた頃低温室に入れて1日放置した。はじめの目的はザラメ雪のよう

な大粒の粒子の結合したものを作るつもりであつたが、粒子は大きくならなかつた。ただし、非常にかたくなつた。

- VI. (A)の雪を低温室内でくだけ、罐にいれて手でおしかためたもの。低温室で1日放置した。
- VII. (C)の雪をくだけないでそのまま罐に入れたもの。したがつて、粒子の大きさは1~3.0 mmであるが、その雪粒の間に5~8 mmの大きい粒がまざっているものと、まざっていないものがある、まざっていない方を(甲)、まざっている方を(乙)とする。
- VIII. 低温室の冷却管についている霜を罐に入れ、+10°Cの部屋で充分しめらせてから低温室に入れて1日放置したもの。
- IX. 低温室にとり入れた時は(A)の雪とおなじ雪であるが、(A)は低温室の床の上においてあつたのに対して、この雪は机の上においてあつた。この場所の相違のために、密度や硬度が少しちがつている。積雪の温度、積雪内部の温度勾配のちがいのために、積雪内部における水蒸気の移動にちがいが生じ、このような結果になつたものかと思われる。くだけないでそのまま罐に入れた。
- X. 氷。罐に水を入れて凍らせた。表面は見たところ平坦になつている。

雪の密度は罐にいれた雪の体積と重さとからもとめた。罐のさしわたしは24 cm、深さは10 cmで鉄の輪の外径が20 cmであるから、輪の外に2 cmの余裕がある。(第1図の罐は高さ5 cmのもので、この測定に使用したものではない)

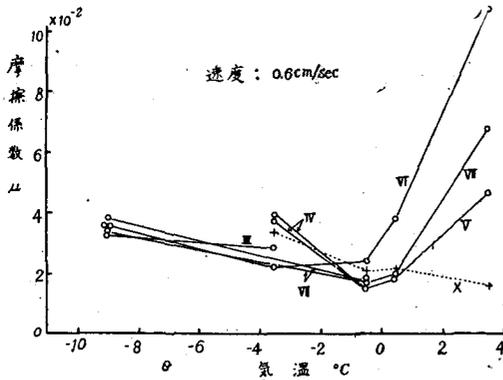
雪Vの-4~-3°Cの欄にある{ }内の値は、測定が終つてからも15 kgの荷重で約30分間廻転をつづけ、その後改めて荷重—抵抗関係をもとめてえた値である。この時、雪の摩擦面はピカピカした状態になつていた。

硬度は黒田式円錐硬度計で測定した。ただし、装置の都合のために摩擦抵抗を測定している恒温箱内の温度で硬度を測定することがむづかしいので、雪を恒温箱からもちだし、雪温-20°C前後で硬度をもとめた。

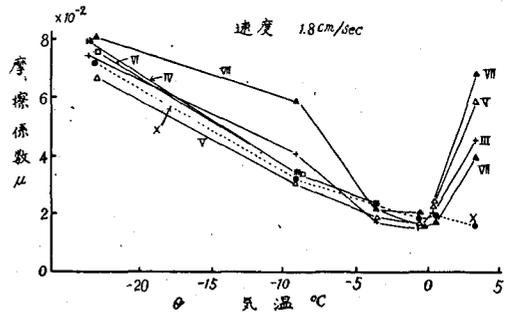
#### IV. 摩擦係数と温度との関係

第1表の摩擦係数と温度との関係を速度別にして図にかいたのが、第3図、第4図、第5図である。同じ種類の雪からえた数値を1つの線でむすんでおいた。

氷のばあいは別にして、雪については、0°Cよりも少し低いところに摩擦係数最小になる温度があり、それよりも温度が高くて、又は低くなつても摩擦係数は増加する。摩擦係数の最小値をしめす温度は、第3図で-0.5°C、第4図では-1°~0°C、第5図では-5°~-3°Cである。第3図は摩擦速度が0.6 cm/sec、第4図は1.8 cm/sec、第5図は38 cm/secであるから、速度がはやくなると摩擦係数の最小値の温度は低い方へ移動している。気温が0°C以上になると、雪の摩擦係数は急激に増加する。0°Cよりも温度が高くなると、雪には水分が次第に多く



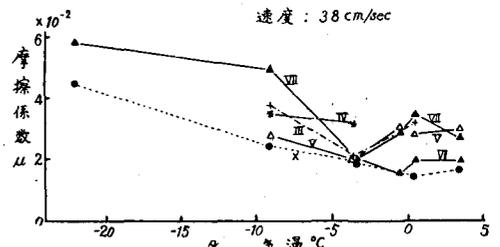
第3圖 摩擦抵抗—気温



第4圖 摩擦抵抗—気温

なつて、ぬれしまり雪になつている。

気温が0°C以上の暖かい日には雪が水気をおびて、スキーや橇が滑りにくいことはよく知られていることである。これに反して、温度が低い時に抵抗がふえることはあまり経験されていない。我が国では日中-10°Cあるいは、それ以下に温度の低くなる積雪地帯

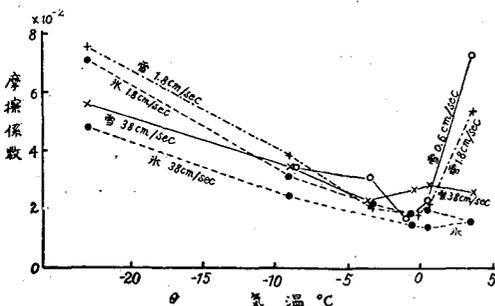


第5圖 摩擦抵抗—気温

が少ないことや、-10°C以下にもなる日は戸外の作業があまり行われていないためかもしれない。このような寒い日にスキーや橇が滑りにくいことをのべているのは北海道の冬山のスキーに関する記事と極地帯旅行の記事とである。北海道の冬山で1月や2月の寒い日スキーで日の当たっている斜面から日かげの斜面に滑つて行くと、スキーが急に滑らなくなる。又極地でも、寒い日には橇がすべりにくくなつて、砂の上で橇を曳いているようであるとのべた記事がある<sup>3)</sup>。寒い日の雪は一般に灰色をした軽くてこまかい雪が多いために滑りにくい原因を灰雪の性質と考へがちであるが、我々の実験のしめすように、しまり雪や、凍りしまり雪、氷でも温度が低くなれば摩擦抵抗は大きくなるのである。

第3図、第4図、第5図の点線は氷のばあいであるが、摩擦係数は、0°C以上の気温では

一定の値になるか、あるいは少し減少する。この点で雪と氷とは非常にちがう。温度が低くなると摩擦係数は急に増加しはじめるが、そのまし方は、雪のばあいにくらべて、小さいか、あるいは同程度である。したがつて、雪とくらべて、氷では摩擦係数に最小値がなく、摩擦係数が小さいといふことができる。



第6圖 摩擦抵抗—気温

速度による摩擦係数の温度変化をくらべる

ために第6図をかいた。実線、鎖線は雪、破線は氷であつて、3種類の速度について各温度の摩擦数の平均値をもとめてえがいてある。第6図によると、 $-9^{\circ}\text{C}$ 以下、及び $+1^{\circ}\text{C}$ 以上で雪の摩擦係数は速度がおそくなる程大きい値になつている。特に $+1^{\circ}\text{C}$ 以上で、この傾向がいちぎるしい。 $-9^{\circ}\text{C}$ と $+1^{\circ}\text{C}$ の間はかなり複雑になつている。 $-7^{\circ}\text{C}\sim-2^{\circ}\text{C}$ では摩擦速度の最もおそいものが摩擦係数が一番大きく、 $-2^{\circ}\sim+1^{\circ}\text{C}$ では速度の最もはやいものが摩擦係数が一番大きい。

氷については、雪よりも簡単である。温度が高くなると速度のちがいによる摩擦係数の差は次第に減少して行き、 $+4^{\circ}\text{C}$ 近くで一致している。温度の低いところでは、雪と同じく、速度のおそい方が摩擦係数は小さい。

第1表、第3、4、5、6図に示めされている摩擦係数の値は黒田その他の人々の測定値<sup>9)</sup>にくらべると一般に小さい値である。我々の測定値に近い値をえているのは、芝の物理常数表<sup>10)</sup>の値であつて、鋼鉄と氷(乾燥)との運動摩擦係数として0.014となつている。この値には温度の記載がないが、 $0^{\circ}\text{C}$ 近くの温度とすれば我々の測定値と一致する。この芝の測定値を別にするると、他の人々の値は筆者等のえた値よりも大きい。筆者等の実験は、摩擦速度が非常に小さい範囲にかぎられているので、もつと速い速度で行われた他の人々のえた結果と比較することは当をえていないかもしれない。しかし、摩擦速度が大きくなるほど、摩擦係数が小さくなるという筆者等の結果から考えると、この実験につかわれた速度よりも、もつと大きな速度においては、摩擦係数はさらに小さくなるものと予想しなければならない。そうすると、他の人々の実験結果とのちがいは、ますます大きくなることになる。はじめにも注意したように、他の人々は、すべて直線形の櫓またはスキーを使つて実験しているので、頭部の抵抗をも含めて測定し、その測定値を摩擦抵抗と考へた。したがつて、このようにしてえられた摩擦係数の値は、当然純粹の摩擦係数よりも大きくなつたわけである。

Bowden<sup>11)</sup>は雪と他の物体との間の摩擦抵抗は、摩擦熱によつて生じた水によつて左右されると考へている。これによつて、筆者等のえた結果も $0^{\circ}\text{C}$ 以下に対してはよく説明できるが $0^{\circ}\text{C}$ 以上の気温のもとでの摩擦抵抗に対しては、Bowdenの説明にはいろいろな困難があらわれる。Bowdenは、結局、櫓を動かすためのエネルギーは全部摩擦面で熱エネルギーにかかわると考へているのであるが、雪は変形しやすいものであるから、櫓が動けばその下の雪は大きな変形をうけ、そのためエネルギーが消費される。雪は粘弾性をもつた物質であるから、櫓の速度の大小により雪の変形の仕方も異なり、その差異が抵抗に影響を与えるのであろう。

終りに、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します。なおこの研究は文部省科学研究費によつて行われたものである。

## 文 献

- 1) 吉田順五・藤岡敏夫 1950 雪橇の研究 I. 垂直な板の抵抗. 低温科学, 5, 85.
- 2) 安積健次郎 1945 軸方向に交番磁化する管の振磁歪効果及び其の工業力学上の應用.
- 3) Scott, J. M. 1933 The Land that God gave Cain. p. 273.  
Cherry-Garrard, A. 1922 The Worst Journey in the World, 2, p.p. 456-7.
- 4) 黒田正夫 1942 橇の抵抗に関する研究 (2). 雪氷, 4, 229.  
Bowden, F. P. 1953. Friction on snow and ice, Proc. Roy. Soc., A, 217, 462.  
藤岡敏夫 1954 スキーの研究 (I). 低温科学, 物理篇, 12, 37.
- 5) 芝 龜吉 1943 物理常数表. p. 90.
- 6) Bowden, F. P. & Tabor D. 1950 The friction and lubrication of solids, p. 65.

## Résumé

An annular plate of iron was put on a rotating sheet of snow or ice and the moment of rotation exerted on the iron plate by the rotating snow or ice was determined experimentally. The moment of rotation, which was measured electrically by the use of magnetostriction phenomenon, yielded the frictional force between the iron plate and snow or ice. The equipment of experiment used is illustrated in Fig. 1 of the text. The snow used was "compact snow" stored for months in the cold room of the Institute to which the authors belong. The ice sheet was made by freezing tap water. The equipment of experiment was placed in a thermostat in the cold room and the experiments were made at several temperatures lying in the range from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+4^{\circ}\text{C}$ . The temperature here means the temperature of air in the thermostat. Therefore, when the temperature was above  $0^{\circ}\text{C}$  the snow was in melting condition and the larger its content was, the higher was the temperature. The relative velocity between the iron plate and snow or ice was 0.6, 1.8 and 38 cm/sec.

Frictional force  $F$  plotted against the load  $W$  showed four different types of curve as shown in Fig. 2.

- (1)-type:  $F$  is proportional to  $W$ .
- (2)-type:  $F$  increases with increasing  $W$ , but with a rate gradually increasing as  $W$  increases.
- (3)-type:  $F$  and  $W$  are proportional to each other as long as  $W$  is small. For large values of  $W$ ,  $F$  seems to tend asymptotically to a constant value.
- (4)-type:  $F$  is proportional to  $W$  as (1)-type, but  $F$  becomes unstable and large fluctuations are observed in its value of  $W$ .

Most of the experiments gave (1)-type. Types (2), (3) and (4) were found in the cases of combination of low temperature and high velocity, of low velocity and of combination of high temperature ( $\geq 0^{\circ}\text{C}$ ) and high velocity respectively.

Frictional coefficient  $\mu$  was determined, in the cases of types (1), (3) and (4), as the ratio  $F/W$  which is constant in the range in which  $F$  changes in proportion to  $W$ . In the case of (2)-type, the whole range of the curve  $F-W$  was approximated by a straight line and the tangent of slope of this line was taken as  $\mu$ . Figs. 3, 4, 5 and 6 show the relation between  $\mu$  and the temperature  $\theta$  for different velocities and for various kinds of snow used. Starting from low temperature,  $\mu$  of snow decreases as temperature

increases and takes a minimum value at a temperature  $\theta_{\min}$ , a few fractions of a degree below  $0^{\circ}\text{C}$ , to increase rapidly for increasing temperature above  $0^{\circ}\text{C}$ .  $\theta_{\min}$  is lower for larger velocity. In the case of ice,  $\mu$  remains almost constant at different temperatures above  $0^{\circ}\text{C}$ .

Bowden explained the decrease of  $\mu$  with increasing  $\theta$  below  $0^{\circ}\text{C}$  as due to the appearance of water of melted snow which is produced by frictional heat. If so,  $\mu$  should continue to decrease with increasing temperature also in the temperature range above  $0^{\circ}\text{C}$  which would be inconsistent with the above described experimental results.