研 究

雪 橇 の 抵 抗 Ⅲ (模型橇の抵抗)

Studies on the Resistance of Snow Sledge Ⅲ (Friction between Snow and a Model Sledge)

藤 岡 敏 夫*, 木 下 誠 一

T. FUJIOKA*, S. KINOSHITA

§ 1. は し が き

雪橇の抵抗については、橇(材質、構造)及び雪面(雪質、温度、含水率)の両面から多くの研究がなされている。又理論的な面から雪の摩擦機構について、Bowden¹⁾の研究が知られている。併し雪の性質が複雑なため、実験も理論もまだ十分なものではない。

雪橇が進む時には、雪の破壊と圧縮を伴い、そのため橇の速さが一定であっても、橇が受ける抵抗力は一樣なものではない。このような抵抗力の変動について、藤岡²⁾、吉田³⁾の研究がある。

筆者等は鉄製の小型の雪橇を作り、この橇が雪から受ける抵抗力の推移を、磁歪計を用い、電磁オッシログラフによって記録した。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が、スプリングは力に対する変形が大きいことのため、またそれを含む測定器の固有振動周期が長いこと、抵抗力の細かい変動を測定するには不適当である。磁歪計は弾性係数が大きいので、以上の欠点がなく、抵抗力の細かい時間的様相を知るのに適している。

実験は1953年冬低温科学研究所の庭で行われたもので、以下にその概要について述べる。

§ 2. 測定装置と方法

実験は第1図のような鉄製の橇を綱で引っぱって行った。1時のアングルで骨組を組み、滑走部には、幅 3.7

cm の帯鉄を使った。先の変曲部分の曲率半径は 20cm 滑走部の水平部分の長さは 50cm で、滑走部の底面積は両側合せて 370cm² である。橇の目方は 10kg で、更に 104kg 迄の荷重を載せるようにした。従って雪面上の静圧力は 27~300gr. wt/cm² であった。

橇が受ける抵抗力は綱が橇を引く力に等しい。第1図のAは磁歪計で、その中心の鉄心に鉄の腕Bが下向きに取付けてある。Bの下端に結んだ丈夫な紐Cを引っぱって橇を動かすと、綱の牽引力が磁歪計Aにかゝって、牽引力に比例して変化する電流が得られる。この電流を長い電線でオッシログラフに導いて記録した。磁歪計は筆者の一人藤岡が鉄板と雪との平面摩擦の測定について使用したものと同型である³⁾。電磁オッシログラフの振動子としてはH型振動子を使った。

橇に力を加えると、0.1~1.2 秒位で橇は動き出す。2~5mの距離を大体一樣な速度(50~80cm/sec)で引っぱった。橇を雪面上に放置しておくと、凍りつきの効果が生ずるので、いつも引き出す前に、あらかじめ橇を雪面上でゆすぶってから引いた。

§ 3. 測定結果

オッシログラムから求めた静摩擦係数、平均動摩擦係数を、実験の情況と共に表に示した。第1表は新雪、しまり雪、湿雪をふみ固めて硬い雪面にした後、その上で橇を引いた場合である。第2表は積ったまゝの、軟かい新雪中を引いた時のものである。

§ 4. 抵抗(牽引力)一時間曲線

オッシログラムの代表的な例をそれぞれ第2、3図に示した。第2図はふみ固めた雪面上で橇を引っぱった例で、第3図は新雪中を埋れたまゝで引っぱった例である。雪質その他の条件で多少の違いはあったけれども、大体皆第3図と同じ型の曲線が得られた。第2図のオッシログラムでは、0.6sec位の周期のかなり正しい変動が見られるが、これはふみ固めた雪の2、3について見られただけで、一般的なものではない。

第1図 測定装置

* 北海道大学低温科学研究所

第2図 牽引力のオツシログラム：荷重30kg-wt,
滑走距離5m. 2月24日

第3図 牽引力のオツシログラム：荷重40kg-wt,
滑走距離4m. 2月4日

A点で橇を引き始め、次第に力が増してB点で最大になる。こゝで橇が動き出す。このときの力が静摩擦抵抗に相当する。その後力が減って、C点以後は大体一定の値になる。B点からC点までは、次第に橇の速さが増して行って、C点以後は大体一定の速度になると考えられる。この速度は大体50~80cm/secであった。但し人が引っぱるのであるから、C点以後の速度にも多少の変動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動摩擦抵抗である。D点で力を抜くと、雪からの抵抗は橇は自然にとまる。

D点で力が完全に抜けたとすれば、力是不連続的に0になるべきであるが、オツシログラムは、D点以後、力がほぼ直線的に減少して、遂にE点で0になることを示

している。即ち、 μ , m , g を夫々動摩擦係数、橇の質量、重力の加速度とすれば、力 f は $f = mg\mu(1 - \frac{t}{\tau})$ で示される。 τ はDからEまでの時間である。手から引網の弾力のために、急には力が落ちないためにこのようになるのである。ところで、オツシログラムの上で力が0になったE点で、橇が停止したわけではない。併し橇の運動もE点よりほんの少し後で停止していることが、次のような計算で示される。DとEとの間では、上記の牽引力の他に $mg\mu$ なる抵抗力が働いているので、橇に関する運動方程式は $\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{g\mu}{\tau}t$ となる。このことから、E点での橇の速度 v' は $v_0 - \frac{g\mu}{2}\tau$ となることが解る。 v_0 はD点での速度である。E点以後は牽引力は0で、動摩擦だけになるので、橇はE点を過ぎて $t' = \frac{v'}{g\mu}$ だけ時間がたつと、とまるわけである。 v' に上の値を入れると、 $t' = \tau_0 - \frac{\tau}{2}$ となる。但し τ_0 はD点で完全に牽引力が0になったとした時、橇がとまるまでの時間である。 v_0 は50~80cm/sec, μ は第1表の値を使えば、大体0.15である。これらの値を用いて計算すると、 τ_0 は $\frac{1}{2}$ sec か $\frac{1}{3}$ sec である。また、 τ は第2, 3図から見て $\frac{1}{2}$ sec 位である。よつて、 τ は $\frac{1}{4}$ sec 位になるわけである。

第1表 硬い雪面

月	日	時	天候	気温	雪質	雪温	密度	硬度	静摩擦係数	動摩擦係数
1	28	14.00	曇	-4.0°C	しまり雪	-4.0°C	0.44	8cm	0.2	0.12
	29	14.00	雪	-3.8	しまり雪	-3.5	0.40	6.5	0.25~0.4	0.17
	30	11.30	晴	-1.2	表面新雪	-1.6	0.48	7.3	0.32~0.37	0.13
2	3	12.00	晴	-3.4	しまり雪	-3.6	0.51	7.7	0.25	0.12
		16.00	雪	-6.2	しまり雪	-4.4	0.55	7.5	0.35~0.5	0.17
	4	16.30	曇	-7.5	表面新雪	-6.4	0.40	7.8	0.4~0.45	0.19
	5	16.30	曇	-13.4	新雪	-8.8	0.40	8.2	0.22~0.37	0.12
	11	15.00	雨	-2.1	しまり雪	0	0.59	7.5	0.3~0.4	0.18
	18	14.00	曇	-7.4	新雪	-4.2	0.37	8	0.3~0.5	0.19
	24	14.30	晴	+4.2	湿雪	0	0.67	7.5	0.2~0.4	0.18
3	11	15.30	曇	+0.2	湿った新雪	0	0.53	7.6	0.23~0.4	0.22

第2表 新雪中

月	日	時	天候	気温	雪質	雪温	密度	硬度	厚さ	橇が沈んだ深さ	全重量	静摩擦係数	動摩擦係数
2	4	16.30	曇	-7.5	乾く	-6.8	0.1	-2cm	20cm	15cm	40kg	0.6	0.38
	18	14.00	曇	-4.2	乾く	-4.2	0.07	-4	25	20	10	2.8	2.1
3	11	14.30	曇	+1.2	しめる	0	0.11	0	9	6	10	1.6	0.6
											30	0.53	0.4
											40	0.6	0.4
											60	0.5	0.3

橇が動いているBC

Dの間では、平均抵抗力にかなり大きな変動抵抗力が重畳している。これらの変動には地形や引き方の僅かの不均一のために生じたものが当然含まれている。しかし雪面、荷重、引っぱる速さを変えて行つたいくつかの実験のどれにも、この変動があらわれるのであるから、力の変動は雪面の抵抗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、スキーの抵抗に細かい変動があらわれることを見、それをスキーが雪を破壊圧縮するために生ず

るものであると解釈した。雪を破壊圧縮する際に間接的な力があらわれることは、木下の実験⁵⁾(橇を雪の中に落すときに生ずる抵抗の研究)によつても明らかである。又その理論的な解釈については吉田⁶⁾の報告がある。従つてこの橇の抵抗の場合にも、雪を破壊圧縮するために生じた変動抵抗が含まれている筈である。しかしスキーに比べて速度が小さいので、また別の事情によつても考えられる。

この変動の周期は、0.05~0.6sec で、橇の進んだ距離に換算すると、4~24cm になる。振幅は高々数 kg-wt のものであつた。

この変動の中から雪を破壊圧縮するために生じた部分だけを取り出すことは困難であり、従つて雪質とどんな関係にあるかをきめることも、今後の研究にまたなければならない。

§ 5. ふみ固めた雪面の静摩擦

一般に静摩擦抵抗は牽引力を徐々に増して行つて、動き出す瞬間の力で表される。この実験では、橇をゆすぶつて、橇の滑走部と雪面との凍りつきを除いてから、直ちに力を加えて引つぱるという方法で行われた。

まず、橇が動き出す瞬間B点の力 F_s をとつて、橇の荷重 W (橇の目方も含めて) と比べてみる。 F_s と W とが比例すれば、 F_s/W を静摩擦係数とすることが出来る。 F_s と W とのグラフを第4図に示す。グラフの測定点は、雪をふみ固めたしまり雪とふみ固めた新雪に分け、夫々の雪について乾いたものと湿つたものに分けて示してある。雪質によつて橇のすべりに難易のあることが日常経験されるので、実験が行われた雪についてもこの四種類に分けてみたのである。実験が行われた湿つた雪は、第1表の雪密度 (0.53, 0.59, 0.67) から解るように、含水率のかなり大きなものであつた。

グラフの点の分布からみられるように、雪質による差異は殆んど現れていない。また、同じ種類の雪についても、かなり分散しているが、すべての点が $F_s=0.2W$ と $F_s=0.5W$ との二直線の間に分布しているので、静摩擦係数は 0.2~0.5 の範囲の値であるということが出来る。

温度と静摩擦係数との関係。我々の測定は、雪温 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、気温 $0^{\circ}\text{C}\sim +5^{\circ}\text{C}$ の範囲について行われたが、温度と静摩擦係数との関係を示す第5図からみられるように、静摩擦係数は温度によつて殆ど変化しない。静摩擦係数の測定には、他に鉄板張り橇を使つたものとして、四手井⁷⁾、Pavlov⁸⁾ のものがある。四手井のしまり雪について行つた測定では、 -0.9° 、 -0.6° 、 -0.7°C の気温で、いずれも 0.06 の値が得られている。

しまり雪について Pavlov が得た値は、気温 -4° 、 -10°C の時夫々 0.40, 0.15 である。第5図には四手井、Pavlov の値も書き入れてあるが、我々の測定値は Pavlov の値とはそれ程ひどく違つてはいないが、四手井の値との差異は非常に大きい。Bowden は鉄についての測定はなく、アルミニウムについて調べているので、その値を第5図に△で示した。この値は我々の値とよく一致する。

第4図 静摩擦抵抗と荷重との関係

第5図 温度と静摩擦係数 μ との関係○印、△印の 0°C 以下にある部分に関しては、温度は雪温を表す。他の場合の温度はすべて気温である。

櫓を雪の上に放置すると、静摩擦抵抗が増すことが知られていて、普通“凍りつき”と呼ばれている。我々の実験でも、四手井の実験でも、“凍りつき”が起らないように、測定前には櫓を雪の上で動かしているのであるが、特に櫓を雪の上に40分間放置してから、引つづいた時の値を第4図に「放置」と書き添えて示してある。これからみられるように、40分間放置しておいても、それ程ひどい差が出るわけではないから、ことさら放置するということがない限り、放置の影響は小さいものと考えなければならない。四手井の場合と我々の場合とで、櫓をゆすぶってから引き出す迄の短い放置時間が同一であったとはいえないが、いずれにしてもどちらも短い時間であるから、放置時間の差が原因で、四手井の値と我々の値との食い違いを説明することは出来ない。

§ 6. 櫓の引き方の影響第

雪は弾性と粘性の二つの性質をもっていることが、吉田⁹⁾、小島⁹⁾によつて報告されている。従つて、雪の変形とか破壊には、力が増えられている時間を考えに入れるなければならない。四手井の実験では、櫓と引綱の間にスプリングを取付け、その伸びを目で読取つて、力の大きさを測定した。力の増加して行く有様を目で追つて行くのであるから、力の加え始めから櫓が動き出す迄の時間は、5~10秒位はあつたであろう。我々の実験では、力の変化は自動的に記録されるので、ゆつくりと力を増加する必要はない。オツシログラムからも解るように、力をかけてから1秒以内で櫓は動き出している。Pavlovの装置はスプリングを利用したもので、自記記録になつてはいるが、電気を利用したものではなく、すべて機械仕掛けなので、力のかけ方が四手井の場合よりは速いことは明らかであるが、我々の場合よりはゆつくりしてゐたであろう。第5図を見ると、四手井の値が一番小さく、我々の値が一番大きく、Pavlovの値がこの中間を占めている。この順序から考えると、櫓はゆつくりした力のかけ方では小さい力で動き出し、力のかけ方が速くなると、大きな力が必要になるように見える。

Baker と Preston¹⁰⁾ はガラス及び陶器の破壊強度と力を加えた時間との関係を求めている。その結果をまとめた Glathart と Preston¹¹⁾ の報告によると、ガラスや陶器も粘弾性をもつた物質であつて、力を加える時間が長いと破壊強度は低下する。ある大きさの力 f で破壊が起るためには、その力のある時間 τ だけかけておく必要があるのであつて、 f が小さい程 τ は長くなる。その関係は $\frac{1}{f}$ が $\log \tau$ に比例するという関係で表されている。

櫓を引き出した時、櫓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。従つて、静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、その力は静摩擦係数 k に比例するであろう。それで、同一の雪面を使つて、力を加えてから櫓が動き出す迄の時間、即ち第2, 3図のAB間の時間 τ を変化して、 k を決めてみた。第6図に τ と $\frac{1}{k}$ との関係を示してある。明らかに τ が大きくなると $\frac{1}{k}$ は増し、静摩擦抵抗が減る。第6図の範囲は狭いので、乱暴なことになるけれども、ここに示された $\frac{1}{k}$ と τ の関係を $\tau=10\text{sec}$ あたり迄延長すると、 k の値として0.1以外の値が期待される。このようにして四手井が k の値として0.1以下を得たのは、 τ が長かつたためとして説明し得るように思われる。

第6図 静摩擦係数 k と力を加えてから櫓が動き出す迄の時間 τ との関係

§ 7. ふみ固めた雪面の動摩擦係数

§4で述べたように動摩擦には細かい変動があるが、大体の平均値をとつて計算した動摩擦係数が第1表に示されている。一例として3月11日について、動摩擦抵抗と荷重（櫓の目方を含めた）とのグラフを第7図に実線で示す。ほぼ直線上に分布し、その傾斜から動摩擦係数を求めると0.22である。他の測定についても、同じようにほぼ直線上分布している。静摩擦のときと違つて動摩擦の場合には、次のように雪質によつてその値に区別があらわれる。

第7図 新雪についての動摩擦抵抗と荷重との関係

乾いた雪 (しまり雪 0.12, 新雪 0.17~0.19)

湿った雪 (しまり雪 0.18, 新雪 0.22)

乾湿の程度が同じなら、新雪よりもしまり雪の方が動摩擦係数が小さいが、どちらの雪についても、乾いているときよりも湿ったときの方が、動摩擦係数は大きい。湿ったときの方が動摩擦係数が大きいという結果は、藤岡 疋田の行った鉄の円板と雪との動摩擦の研究⁹⁾に於ても得られている。

§ 8. 新雪中の動摩擦係数

ふみ固めない新雪の場合には、橇が新雪の中に埋れるため、頭部及び側部からの雪の抵抗が加つて、静摩擦動摩擦共に抵抗の値は、ふみ固めた雪面の場合に比べて大きい (第 2 表参照)。併し前にも述べたように、オツシロプログラムにあらわれた牽引力の細かい変化の関係は、ふみ固めた雪の場合と変らない。

第 7 図にふみ固めた新雪についてのものと一緒に、ふみ固めない新雪についての測定結果が×印と点線で示してある。この場合には橇は雪面下に大体 6 cm 沈んだまゝで動いた。測定点はほぼ直線上に分布していて、ふみ固めた場合の実線と大体平行で、全体として抵抗が 7 kg-wt ほど大きい。従つてこの 7 kg-wt の抵抗が頭部及び側面からの抵抗の分と考えられる。

頭部からの雪の抵抗は、主に頭部にぶつかる雪を圧縮するために生ずる抵抗であると考えられる。この分の抵抗を f kg-wt とすると、橇が a cm 進む間に、この抵抗がなした仕事は fa kg-wt-cm である。又その間に深さ 6 cm, 両側滑走面合せて 7.4 cm の幅の長さ a cm のスプールが作られる。雪の密度は 0.11 であつたので、圧縮された雪の量は $6 \times 7.4 \times a \times 0.11 = 5a$ gr となる。即ち fa kg-wt-cm の仕事で 5a gr の雪が圧縮されるわけである。木下⁹⁾によると、密度 0.15 の新雪は水平の 1 cm² あたりについて、衝撃エネルギー 1 kg-wt-cm で 1 gr が圧縮される。つまり 1 gr の新雪を圧縮するのには、1 kg-wt-cm のエネルギーが要るわけで、5a gr の新雪を圧縮するのには、5a kg-wt-cm の仕事が必要となる。従つて上記の f は 5 kg-wt となり、橇の頭部の抵抗は 5 kg-wt ということになる。第 7 図から、頭部及び側面の抵抗を合せて 7 kg-wt と結論したが、もしもこれらの値が正しいとすれば、側面の抵抗は 2 kg-wt となり、頭部の抵抗に比べて小さいことになる。

終りにこの研究に際し御指導下さった吉田順五教授、御協力下さっ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行われたものである。

文 献

- 1) Bowden, F.P.: 1953 Friction on Snow and ice. Proc. Roy. Soc., A, 217, 462.
- 2) 藤岡敏夫: 1954 スキーの研究 I. スキーを前へおしすすめる足の力. 低温科学, 物理篇, 12, 37.
- 3) 吉田順五: 1954 スキーの研究 II. スキーの抵抗に関連した理論的考察. 低温科学, 物理篇, 12, 51.
- 4) 藤岡敏夫, 疋田裕: 1954 雪橇の抵抗 II. 積雪と鉄の板との摩擦(2). 低温科学, 物理篇, 13, 37.
- 5) 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.
- 6) 吉田順五: 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, 10, 1.
- 7) 四手井綱英, 宮川信一: 1951 雪ぞりの静摩擦に関する二三の模型実験. 雪永. 12, 128.
- 8) Veinberg, V.P.: 1940 Led (Ice). 496.
- 9) 小島賢治: 1955 積雪の粘弾性に関する実験. 雪永 16, 4.
- 10) Baker, T.C. and Preston, F.W.: 1946 Fatigue of Glass under Static Loads. Jour. Appl. Phys. 17, 170.
- 11) Glathart, J.L. and Preston, E.W.: 1946 The Fatigue Modulus of Glass. Jour. Appl. Phys. 17, 189.

原稿と写真の募集

次号から要報 (寄書) 通信・抄録・書評等の欄を訪けますから多数原稿をお寄せ下さい。

要報(寄書): 研究・調査の速報等で簡単な発表とし、400字詰 2~3 枚程度のもの。

通 信: 会員相互の通信、質問等で内容は随意。

抄 録: 国内、外国等の研究の簡単な紹介。

書 評: なるべく新刊書で雪氷研究に関係のあるもの。

写 真: 表紙用のもの、表紙見返し用のもので撮影年月日、場所及び出来ればその他のデータ、簡単な説明 (表紙見返し用のものは 400字詰 1 枚以内) を付して下さい。

写真掲載の分には薄謝を呈します。