



Title	雪橇の抵抗 IV : 積雪と板との摩擦 4
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio
Citation	低温科学. 物理篇, 21, 31-44
Issue Date	1963-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17995
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p31-44.pdf



雪 橇 の 抵 抗 VI*

— 積雪と板との摩擦 4 —

藤 岡 敏 夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 37 年 10 月受理)

I. ま え が き

筆者はさきに積雪と平らな板との平面摩擦をしらべ、雪橇の抵抗 IV¹⁾, V²⁾として報告した。板には鉄、硝子、メタアクリル酸メチル樹脂の板を用いたところ、摩擦係数 μ と、板の熱伝導率 k との間には簡単な関係がない結果になった。普通、 k の小さいものは、雪や氷に対して μ が小さいとされているのである³⁾ から、それとは矛盾する結果になったのである。それで、板と接している積雪の真実摩擦接触面をみることを試み、硝子の清浄面の摩擦をうけた後における積雪の真実接触面の形、個数を簡単に報告した²⁾。

今回は硝子とメタアクリル酸メチル樹脂によって、雪の真実接触面にどのようなちがいがあらわれるか、また、これらの板の面に他の物質のうす膜が存在する時、真実接触面にあらわれるうす膜の影響を観察し、同時に摩擦抵抗 f のちがいをもしらべた。記述の便宜上、摩擦抵抗 f を先にのべ、真実接触面の観察を後に報告する。なお、簡単のため、さきに発表した雪橇の抵抗 IV, V を、それぞれ、単に報告 (4), 同 (5) とよぶことにする。

II. 摩 擦 抵 抗

1. 実 験 装 置

実験に使用した装置は、報告 (5) において真実接触面をしらべるために用いたものとおなじものである。すなわち、鉛直軸のまわりに廻転する板の上に、四角に切った積雪の一面をおしつけた。雪の塊には端があるから、報告 (5) にものべたように、端の影響をうけて、この摩擦は完全な平面摩擦になっているのではない。摩擦力 f は電氣的にとりだされ、記録は主としてペン書きの電子管式記録器でおこなわれ、電磁オッシログラフも補助的につかわれた。

板の廻転速度は 1 回転 7.1 秒で、雪は 9.7 cm/sec の線速度 V で 5 分間摩擦された。雪の塊の見掛の接触面積は 2 cm × 3 cm で、長辺の方向に摩擦され、雪に加えられた垂直荷重 W は 250 gr であった。報告 (5) において、真実接触面をくらべた時の V は 6.9 cm/sec, W は 279 gr,

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 631 号

摩擦継続時間は5分で、雪の試料は2 cm×3 cmの摩擦面をもっていた。今回の実験においても、結果を報告(5)の結果と比較するために、上にかかげた諸量はほぼひとしくとられた。

温度 T_s は $-1\sim-2^\circ\text{C}$ で、報告(5)における $T_s = -4^\circ\text{C}$ にくらべて高くなった。これは、真実接触面における雪の変形が、温度が高いほど容易におこり、観察しやすいからである。 V 、 W 、 T_s 、摩擦継続時間は、今回の実験のいずれの場合でも同一であり、雪の試料も密度 0.25 gr/cm^3 のしまり雪がつかわれた。なお、報告(4)、(5)において、摩擦抵抗 f には、 T_s と V とによって、A、B、Cの3つの型があらわれることをのべた。今回の実験の T_s 、 V は、C型の f のあらわれる条件であり、また、実際にC型の特徴を示す変動の多い f が観測された。

雪と摩擦する板は硝子とメタアクリル酸メチル樹脂(三菱レーヨン製、透明アクリライト、001)であるが、これらの板の表面処理の仕方によって、次の5種類の測定がおこなわれた。

1. 硝子の清浄面
2. 硝子面にラッカーをぬったもの
3. 硝子面にシリコン液をぬったもの
4. メタアクリルの清浄面
5. メタアクリルにシリコン液をぬったもの

1、4の清浄面は、よく洗濯されたガーゼに石鹼をつけてよく洗い、多量の湯で石鹼を洗いながした面である。硝子の場合、全面がよく水にぬれるならば、少なくとも、仕上り面に油脂膜の存在しないことがわかるが、メタアクリルは、元来、水をはじく性質をもっているため、仕上り具合を、硝子の場合のように、簡単にしらべることができなかった。

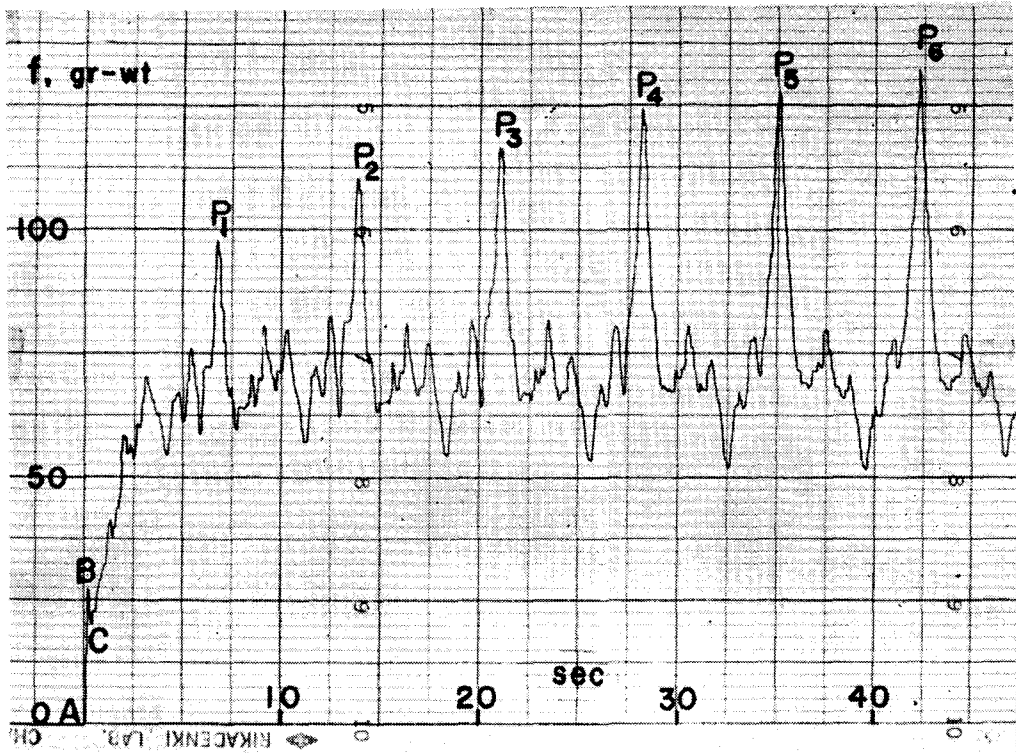
2につかったラッカーは、市販のクリヤーラッカーで、シンナーで2倍にうすめて刷毛ぬりした。刷毛は摩擦の方向につかい、ラッカーが乾いた時、刷毛目が摩擦の方向を横切らない様に気をつけた。

3および5に使用したシリコン液は、東芝製 TS 951、運動学的粘性係数10センチストークスのものである。よく洗濯されたガーゼにつけ、板の表面に、ごくうすくぬった。

2. 摩擦抵抗の変動

ペン書き記録器でえられた摩擦抵抗 f の記録の1例を第1図にしめた。前節に1とした硝子の清浄面の場合で、横軸は時間で左から右にすすみ、縦軸は摩擦抵抗 f の大きさをあらわす。A点で雪と板との間に迂りの力がくわり、 f が増加してB点に達した後迂りがはじまる。同時に f はC点まで降下した。B点の f は最大静止摩擦抵抗 f_s で、第1図では27 grをしめしている。

ペン書き記録と同時に記録したオッシログラムによると、 f_s は47 grに達し、A点からB点までの時間は0.03秒であった。電磁オッシログラムの振動子の固有振動周期は1,000サイクルであったから、オッシログラムにあらわれた $f_s = 47\text{ gr}$ は正しい値とみて差支えがない。ペン書き記録器のペンの移動速度は、第1図の記録の上で、0から50 grまで移動するのに0.14秒を要し、急激な f の変動には追従できないのである。しかし、第1図のB点をすぎた後は、



第1図 摩擦抵抗の記録，ガラス清浄面，温度 $T_s = -2 \sim -1^\circ\text{C}$ ，荷重 $W = 250 \text{ gr}$ ，
摩擦速度 $V = 9.7 \text{ cm/sec}$ ，雪の密度 $\rho = 0.25 \text{ gr/cm}^3$ ，しまり雪

オッシログラムにも急激な f の変動はなく，その結果，ペン書きの記録とちがいのない記録になった。

B 点以後， f は C 点までの低下をみたが，その後変動をともないながらも次第に増加し，A 点より 6.7 秒後に，極大値 P_1 点に達した。 P_1 点をすぎて f は急激に低下するが，再び増加して，第2の極大値 P_2 に達した。以後おなじ経過をたどって， P_3, P_4, P_5, \dots の極大値があらわれた。これらの極大値の間隔はひとしく，7.1 秒で，これは，II-1 にのべた，板の廻転速度に丁度ひとしい値である。この f にみられる変動の周期性は，板を硝子からメタアクリルにかえても，板にラッカーやシリコンをぬってもあらわれた。このため，板の廻転速度のむらも， f の周期的変動の原因のようにみえる。しかし，次の点でお疑問を残している。

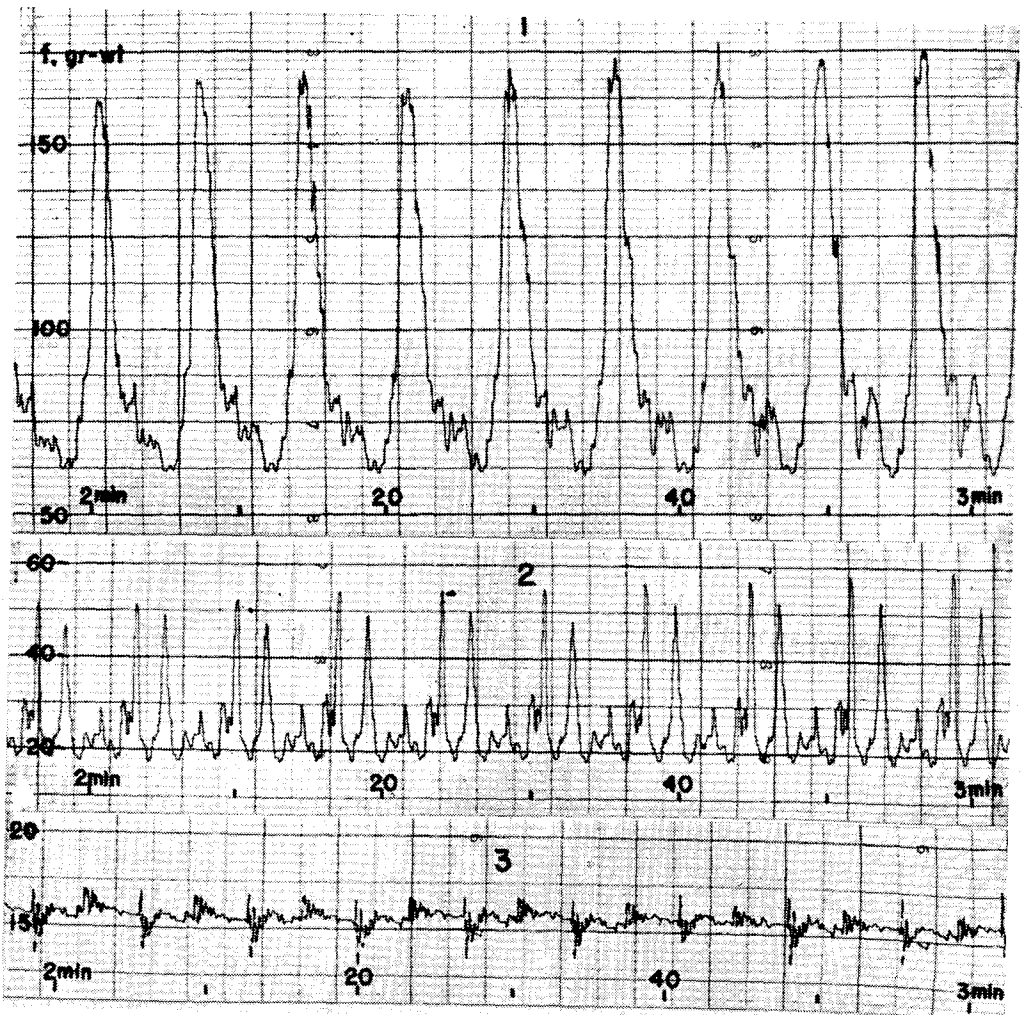
板は1馬力のモーターとギヤー，プーラーによって駆動され，みたところ，一樣な速度で滑らかに廻転した。また，報告(5)にものべたように， $V = 9.7 \text{ cm/sec}$ ， $T_s = -2 \sim -1^\circ\text{C}$ の条件では， V, T_s に多少の変動があっても， f には大きな変化はあらわれない。今回の実験で，5分間の摩擦をおえ，モーターの電源を切ると， V は次第に減少して約8秒後に0になった。この V の減少の途中， f には特別な変化はなく，一定の V の時とおなじ f がみられ， V が0に近くなつてはじめて f が低下した。したがって，板の廻転速度にムラがあつても，そのため

に f に大きな変動が生ずるとは考えられないのである。なお、 V が変化しても f に変動がみとめられないのは硝子の清浄面、同ラッカーぬりの面及びメタアクリルの清浄面の場合で、硝子およびメタアクリルにシリコン液をぬった場合にはこのようにはならない。この場合については II・6 でのべる。

f の周期的な変動の原因として、はじめ、雪をのせた板の上に何らかの痕跡がのこり、その痕跡がその後の雪のたりの障害になるのではないかと考えられる。しかし、肉眼および顕微鏡でみた限りでは、このような痕跡はみあたらなかった。

3. 硝子の清浄面、ラッカーぬり面、シリコンぬり面の場合の摩擦抵抗

第1図の f の極大 $P_n (n=1, 2, 3, \dots)$ は、時間が経過し、 n がますますつれて、その値 f_{\max} が



第2図 雪と硝子との摩擦、 T_s , W , V , ρ は第1図におなじ。摩擦のはじめより2分後。1) 硝子清浄面、2) 硝子ラッカーぬり、3) 硝子シリコンぬり

大きくなる。しかし、その増加の仕方は、時間とともに減少し、摩擦をはじめてから2分後には大体一定の値をとる。また、 f の変動の極小値 f_{\min} 、あるいは極大値 P_n と P_{n+1} との間の f の平均値 \bar{f}_n も、2分程度で一定の値をとるようになる。

第2図、第3図に、 \bar{f} ははじめから2分後における硝子およびメタアクリルの板の1分間の f の記録をかかげた。図にかきいれてある1, 2, 3, 4, 5の番号は、II・1にのべた硝子、メタアクリルの板の表面処理の順序をしめしている。

第2図の1は硝子の清浄面の場合で、第1図の f の続きである。第1図の f の変動よりは単純な形になり、山の部分は高さと同幅をまし、谷の部分は平に近づいた。山の f_{\max} の値は170 gr、谷の f_{\min} の値は62 grで、30秒間の f の平均 \bar{f} は130 grであった。第1表に各種の板についてえられた f_{\max} 、 f_{\min} 、 $\mu_{\max}(=f_{\max}/W)$ 、 $\mu_{\min}(=f_{\min}/W)$ 、 \bar{f} 、 $\bar{\mu}(=\bar{f}/W)$ 、および、 μ_{\max} 、 μ_{\min} の $\bar{\mu}$ よりの偏差 $(\mu_{\max}/\bar{\mu})-1$ 、 $(\mu_{\min}/\bar{\mu})-1$ がかかげてある。第1図および第2図の1の記

第1表 雪と硝子、メタアクリルとの摩擦抵抗 f 、摩擦係数 μ

実験番号	板の種類	f_{\max} (gr-wt)	f_{\min} (gr-wt)	μ_{\max}	μ_{\min}	\bar{f} (gr-wt)	$\bar{\mu}$	$\frac{\mu_{\max}}{\bar{\mu}} - 1$	$\frac{\mu_{\min}}{\bar{\mu}} - 1$
1	硝子	60	40	0.24	0.16	50	0.20	0.20	-0.20
2	清浄面	170	62	0.68	0.25	100	0.40	0.70	-0.37
平均		115	51	0.46	0.21	75	0.30	0.45	-0.29
3	硝子	160	25	0.64	0.10	36	0.14	0.46	-0.29
4	ラッカーぬり	52	18	0.20	0.072	27	0.11	0.82	-0.35
平均		106	22	0.42	0.086	32	0.13	0.62	-0.32
5	硝子	48	45	0.19	0.18	46	0.18	0.05	0.0
6	シリコンぬり	21	17	0.084	0.068	19	0.076	0.10	-0.11
7		17	13	0.068	0.052	16	0.064	0.05	-0.19
平均		29	25	0.11	0.10	27	0.11	0.07	-0.10
8	メタアクリル	250	80	1.00	0.32	169	0.68	0.47	-0.53
9	清浄面	120	85	0.48	0.34	105	0.42	0.14	-0.19
10		300	150	1.20	0.60	240	0.97	0.24	-0.38
11		250	120	1.00	0.48	220	0.88	0.14	-0.45
12		225	95	0.90	0.38	180	0.72	0.25	-0.47
13		115	37	0.46	0.15	87	0.35	0.31	-0.57
14		195	28	0.78	0.11	88	0.35	0.22	-0.69
15		220	74	0.88	0.30	130	0.52	0.69	-0.42
平均		209	96	0.84	0.38	152	0.61	0.31	-0.46
16	メタアクリル	27	19	0.11	0.076	22	0.088	0.25	-0.14
17	シリコンぬり	16	14	0.064	0.056	15	0.060	0.06	-0.07
平均		22	17	0.08	0.066	18	0.074	0.16	-0.11

録は、第1表の実験番号2の記録である。第1表の硝子清浄面の場合の2例の平均によると、 μ_{\max} , μ_{\min} は $\bar{\mu}$ のそれぞれ45%増, 29%減になって、 f の変動の大きいことをしめしている。

第2図の2は硝子に透明ラッカーをうすくぬった場合で、第1表の第4番の記録である。 f の変動の1周期に2つの顕著な山があらわれたが、第1表にしめされた第3番の例では、この山は一つであった。 f_{\max} は2回の測定の前平均で、106 grとなり、硝子清浄面の f_{\max} の平均に近いのであるが、 f_{\min} は22 grで、清浄面の f_{\min} の51 grにくらべて小さく、 $\bar{\mu}$ も0.13と、清浄面の場合の0.30の約半分になっている。このため、2の場合の山は、図にみられるように、幅がせまく、細くなっている。また、この特徴は、 μ_{\max} , μ_{\min} の $\bar{\mu}$ からの偏差が、それぞれ、62%、-32%にもなって、いちじるしく大きいことにもあらわれている。

硝子にラッカーをぬったのは、硝子の表面に、硝子よりも熱伝導率 k の小さい物質の膜が存在する時、 μ がどのようにかわるかをしらべようとしたものである。第1表によると、 $\bar{\mu}=0.13$ となり、硝子清浄面における $\bar{\mu}=0.30$ の43%に減少した。この $\bar{\mu}$ と板の熱伝導率 k との関係についてはII・5で再びのべる。

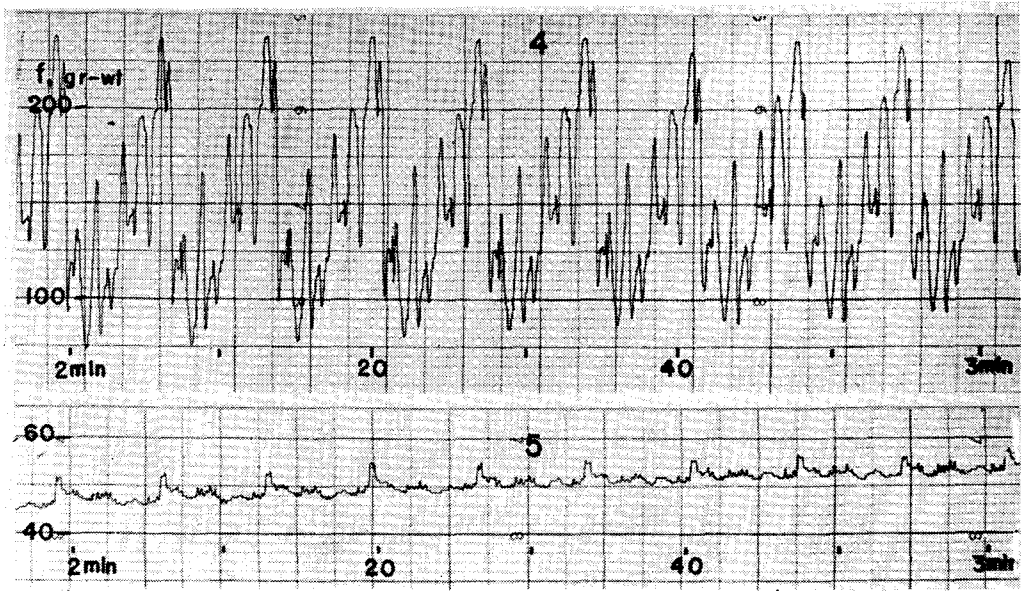
第2図3は、硝子にシリコン液をうすくぬった場合で、第1表の第7番の記録である。 f は平均として小さく、また、 f の変動も少なくなり、3例の前平均で、 $\bar{\mu}=0.11$, $f_{\max}=29$ gr, $f_{\min}=25$ gr, $(\mu_{\max}/\bar{\mu})-1$, $(\mu_{\min}/\bar{\mu})-1$ も1%, -10%と非常に小さな値になった。すなわち、 f は硝子表面のシリコン液のうす膜によって、いちじるしく減少したわけである。

4. メタアクリルの清浄面及びシリコンぬり面の場合の摩擦抵抗

第3図の4はメタアクリルの清浄面、第1表第15番の記録である。図にみられるように非常に変動の多い f が記録され、 f_{\max} の値も220 grで、硝子の清浄面の場合の f_{\max} の前平均値115 grよりも大きい。第3図4にしめした例にとどまらず、第1表にかかげたメタアクリル清浄面の8回の測定の結果をみても、 f_{\max} の前平均値は209 grで、極端な場合としては、第10番のように、 $f_{\max}=300$ grに達するものも測定された。この第10番の場合には、 $\mu_{\max}=1.20$, $\bar{\mu}=0.97$ にもなっている。

金属間あるいは、硝子同志の摩擦で、摩擦しあう物質が両方共非常に綺麗な面である時、 μ が1あるいはそれ以上の値にもなることが知られている³⁾。メタアクリルの清浄面が、石鹼で洗う方法で、どの程度に綺麗になったかは明らかではない。II・1にものべたように、メタアクリルは撥水性をもつために、硝子の場合のように、水による表面のぬれ具合、あるいは呼気によるくもり方から、簡単に表面の検査をすることができないからである⁴⁾。しかし、金属間、硝子同志の摩擦において、表面が綺麗になるほど μ が増加することからみて、メタアクリルの板の場合に、第1表第10番のように、特に大きな μ があらわれたものは、この時表面が特に綺麗であったためと考えるとよいであろう。

第3図の4あるいは第10番の場合に限らず、メタアクリル清浄面の場合全体を通じて、 f が大きいことは、第1表にあらわれている。すなわち、8回の測定の平均として、 $f_{\max}=209$ gr, $\bar{\mu}=0.61$ で、硝子清浄面の場合の $f_{\max}=115$ gr, $\bar{\mu}=0.30$ のほぼ2倍の値である。この μ の



第3図 雪とメタアクリルとの摩擦, T_s , W , V , ρ は第1図におなじ。摩擦のはじめより2分後。4)メタアクリル清浄面, 5)メタアクリル・シリコンぬり

値は、また、報告(5)において、メタアクリルの平面摩擦についてえられた値 $\mu=0.07$ にくらべてもいちじるしく大きい。

報告(5)における摩擦と、今回の摩擦とをくらべて、実験方法に2つのちがいがある。第1のちがいは、報告(5)においては、板にも雪にも端がなく、純粋な平面摩擦が測定されたことである。第2のちがいは、メタアクリルの板の面の拭き方にある。報告(5)においては、板は測定装置にとりつけられていて、簡単にとり外すことができなかった。そのため、面は、低温室内で、アルコールをしみこませたガーゼで拭くことにしていた。今回の場合は、板のとりに外しが容易なため、板は常温の部屋にもちだされ、湯と石鹼で洗われた。以上の2つのちがいのために、 μ にもちがいがあらわれたものと考えられる。

μ_{max} , μ_{min} の $\bar{\mu}$ よりの偏差にも特徴があらわれた。 μ_{max} は $\bar{\mu}$ よりも31%大きく、 μ_{min} は $\bar{\mu}$ よりも46%小さくなっている。すなわち、 f の変動のうち、谷の方の振幅が、山の方の振幅よりも大きくなったのである。

第3図5はメタアクリルにシリコン液をぬった場合で、第1表第17番の記録である。第2図3にしめした硝子にシリコン液をぬった場合とおなじように、 f の平均値も小さく、 f の変動の振幅も小さい曲線になった。

5. 硝子、メタアクリルの摩擦抵抗の比較

前節でのべたように、メタアクリル清浄面でえられた f は、他のものにくらべて非常に大きい。摩擦がはじめてから2分後、 f が定常状態になった時における摩擦係数の平均値 $\bar{\mu}$ は0.61をしめし、硝子清浄面の0.30の2倍にも達している。Bowden は、雪と摩擦する物質の之

りやすさは、その物質の熱伝導率 k に関係があるとのべている³⁾。 k が小さいと、板の真実接触面に発生した摩擦熱のうち、板の方へ逃げる部分が少なくなり、それだけ雪を余計にとかし、迂りやすくなると考えられるからである。ところが硝子の k は 2×10^{-3} cal/cm \cdot sec \cdot °C で、メタアクリルの k は 0.5×10^{-3} である²⁾。 k の小さいメタアクリルが k の大きい硝子よりも大きい $\bar{\mu}$ をもつ結果になったのである。

Bowden がのべたように、摩擦熱によって、雪粒の真実接触面がとけることは、筆者の報告(4)において、メチレン青をつかった実験でたしかめられた。雪粒の一部がとけると、メチレン青がそのとけ水に溶解し、水を着色するのである。また、報告(5)において、雪粒の表面に見える平らな真実接触面が、すべて摩擦熱による、雪粒の融解によって作られたと仮定しても、そのために費されるエネルギーは、雪を迂らせるために費される全エネルギーの1%程度にしかならないことを示した。したがって、 $\bar{\mu}$ が特に小さいか、 k が異常に大きい板で摩擦する場合でない限り、雪粒の融解は容易におこりうるものと考えてよいであろう。なお、硝子やメタアクリルの場合に、実際に雪粒の融解がおこっていると推定されることは、第III節でのべる。

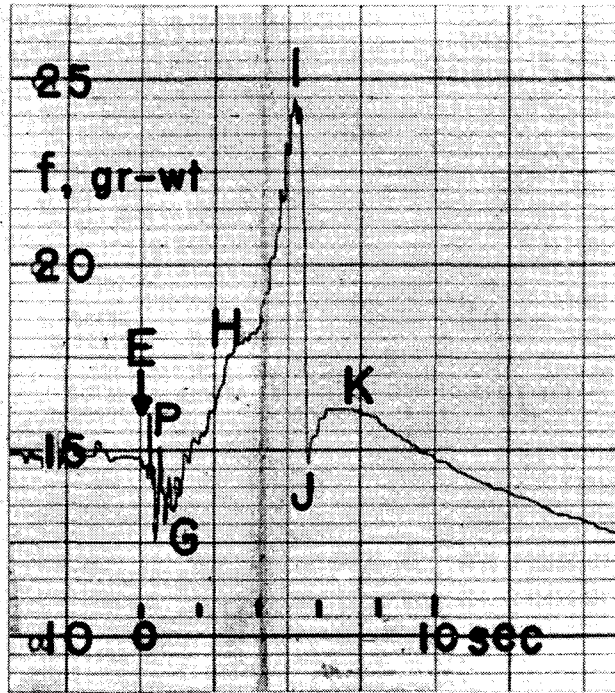
上述のように、第1表にみられる硝子とメタアクリルの清浄面の $\bar{\mu}$ のちがいは、 k のちがいはによって説明できない。板のもつ他の性質も考慮されなければならないわけである。その1つの試みとして、硝子にラッカーをぬった板の摩擦をおこなったのである。ラッカーの k 、その他の性質は不明であるが、高分子物質であるから、その薄膜をもった硝子の $\bar{\mu}$ は硝子とメタアクリルとの中間の値をしめすのではないかと予想されたのである。しかし、第1表にみられるように、 $\bar{\mu}$ は0.13となり、硝子よりもさらに小さな値になった。

$\bar{\mu}$ のさらに小さな値をしめしたものに、硝子およびメタアクリルにシリコン液をぬった場合がある。金属間摩擦や、硝子同志の摩擦でも、摩擦面に液体潤滑膜があれば、一般に μ は低下する。今回の場合でもシリコン液によって μ の低下をみたわけである。そして、シリコン液をぬった下地の板が、硝子あるいはメタアクリルの何れであっても、 $\bar{\mu}$ として0.1前後の値があらわれたことは、 $\bar{\mu}$ の決定には、板のごく表面の性質が非常に大きな影響をあらわすことをしめしている。すなわち、下地の板の k や、その他の性質の影響はあまりあらわれないことになる。

6. 摩擦面にシリコン液が在存する場合の摩擦速度と摩擦抵抗との関係

硝子やメタアクリルにシリコン液をうすくぬっておこなった実験で、 V のおそいところで f の増加がみられた。5分間の摩擦をおわり、モーターの電源を切ると、速度 V は次第に小さくなり、7.6秒後にはとまった。第4図にこの時の f の記録をしめしてある。第1表第17番の記録で、第2図3の記録の最後の部分にあたる。図の横軸には、電源を切ったからの時間をしめしてある。

E点で電源を切ると、 f はP、G、H、I、J、Kの複雑な変化をしめし、K点で摩擦面の迂りはとまった。K点以後、 f は指数函数に似た形で減少する。第4図の f の特徴は、I点でしめされる f の非常に大きな値が、 V の減少する途中にあらわれることである。シリコン液を用い



第4図 V の低下する途中における f の変化。硝子シリコン液ぬり。E点で駆動用モーターの電源を切ると、 V は9.7 cm/secより次第に低下し、7.6秒後、K点で0になった。 T , W , ρ は第1図におなじ

ていない場合には、 f はE点以後も、E点以前のままの f をしめし、K点を過ぎてから指数函数的に減少した。すなわち、 f は V に無関係に一定の値をもつのである。この結果は報告(5)の結果とも一致している。

f の最大をしめしたI点における値は、24.5 grで、E点以前における f の平均値 $\bar{f}=15$ grの1.6倍にあたる。このI点における速度 V は測定されていないが、EからK迄、 V が時間とともに一様に減少したとすると、 $V=2.9$ cm/secとなる。

IからJまでの f の急激な低下の時、摩擦面でどんなことがおこったかわからない。観測者は低温室の外の部屋で、記録器を操作していて、現象をみていないからである。I→Jの急激な低下をとまなう f の山があらわれたのは、第1表の硝子・シリコンぬりの場合で3例中1例、メタアクリル・シリコンぬりの場合の2例全部である。硝子・シリコンぬりで f に山のあらわれなかった他の2例では、 f は増加するが、増加したままで $V=0$ のK点にいたり、以後は指数函数的に低下している。ただし、その際の f の最大値は、第4図のIの値よりも小さかった。

I点にあらわれた f の山が、II-2でのべた板の1回転毎におこる f の周期的な変動に属さないことは次のことからわかる。板の1回転毎にあらわれた f の変動の周期は7.1秒で、 V は9.7 cm/secであったから、摩擦面が69 cmすすむ毎に変動があらわれたことになる。

板の回転に原因をもつ f の山は、E 点より 0.5 秒の P 点にあらわれている。P 点における速度 V_P を、I 点における速度 V_I をもとめたとおなじ方法で求め、 V_P と V_I の平均値に、P, I 間の時間をかけると、この間の摩擦面の移動距離になる。この距離は 32 cm である。この値はさきにもとめた板の 1 回転に摩擦面の移動する距離 69 cm の半分にすぎない。したがって、I 点にあらわれた f の山は、II・2 にのべた f の周期的な変動とは無関係なものである。

III. 雪の粒子の真実摩擦接触面

第 II 節でのべた摩擦抵抗 f の測定をおこなった後、アニリン固定法⁵⁾ を利用し、報告 (5) にした方法で、雪の粒子の真実摩擦接触面の顕微鏡写真をうった。

1. 硝子清浄面と摩擦した場合

図版 I の写真 (1) は第 1 表第 2 番の硝子の清浄面の場合で、写真にかき入れてある矢印の向は板の違った向をあらわし、矢の長さが実際の 1 mm にあたる。

報告 (5) で、摩擦をうけた雪粒には、摩擦によって形成された平らな面が存在するとのべた。図版 I-(1) の a, b, c, d, e, f とした平らな面は、報告 (5) にみられたものと同種類のもので、摩擦によって作られた真実接触面である。

a の平らな面の右下、g としたところに、直径が 1/100~2/100 mm の細かな氷の粉がみえる。同様な粉は、h, i としたところにもあらわれた。氷の粉は、雪を切り出して摩擦の試料をつくるときにも、加工による氷屑としてできることが予想される。しかし、実際に雪の試料を板の上におき、荷重をかけただけで、摩擦をしなかった場合には氷の粉はあらわれなかった。また、摩擦をおこなった時でも、板にシリコン液をぬったために、 μ が小さい時には氷の粉はあらわれなかった。g, h, i とした氷の粉は、雪粒が強い摩擦をうけ、雪の粒に平らな面が形成される途中に生じたものと考えなければならない。

g の氷の粉は、g が附着している雪粒に、平らな面が作られた時に生じたものであろう。h の粉も、f 面が作られた時の生産物と考えてよい。ところが、i の粉のついている雪の粒には平らな面が存在しない。i の粉は、他の雪粒からとりさられた氷の粉が、移動してきたものである。

b, c, d, e の平らな面をもつ雪粒には、氷の粉が附着していない。しかし、これは、これらの面が作られる過程で、氷の粉が生産されなかったことを意味するわけではない。i の粉のように、他の粒から移動してきた氷の粉も存在するからである。

氷の粉のでき方には、2 通りの原因が考えられる。第 1 は、雪粒の真実接触面における機械的摩擦で、第 2 は真実接触面における雪粒の融解である。雪粒の真実接触面の氷のごく一部がとけてわずかの水ができ、その水が移動して凍結し、1 個の小さな粒となつて、接触面外で雪粒に附着する過程が、次々と数多くおこれば、それでも写真にみられるような氷の粉になるからである。このことについては、III・4 でくわしくのべる。

2. 硝子・ラッカーぬり面の場合

図版 I-(2)は、第1表第4番のラッカーをぬった硝子と摩擦した雪の摩擦面の写真である。a, b, c, d としたものは、表面を平らにされた雪粒で、これらの雪粒の間に黒くうつっている部分は氷の粉である。図版 I-(1)にくらべて、氷の粉の量ははるかに多い。そのため、雪粒同志の間の空間は、場所によっては、すっかり氷の粉で埋めつくされてしまった。

図版 I-(1)の写真にくらべて、氷の粉が多いことから、ラッカーぬり硝子の方の μ が、硝子清浄面の μ よりも大きいように考え勝である。しかし、第1表にしめされているように、事実はその反対になっている。

a, b, c, d の雪粒の上には、摩擦の方向に平行なすじがみえる。同様なすじは、図版 I-(1)にあらわれた雪粒の平らな面にもみえている。報告 (5) にかかげた雪粒の真実接触面には、このようなすじはみられなかった。

3. 硝子・シリコンぬりの場合

図版 II-(3)は、シリコン液をうすくぬった硝子で摩擦された雪の摩擦面で、第1表第7番のものである。図版 I-(1), (2)にくらべて、写真にみえている雪粒の数は少ないが、これは雪の薄片をつくる時に、あまりに薄く削りすぎたためである。

a, b, c とした面は、摩擦によって平らにされた面である。この場合には、平らな面には、図版 I-(1), (2)にみられた面の上のすじは見当らない。また、(1), (2)の写真にみられた氷の粉も存在しない。雪粒の間の空間や、雪粒に附着している小さな球は、アニリンの液中に懸垂しているシリコン液の小球である。

図版 I-(3)の摩擦面は、氷の粉が存在しないこと、平らな面にすじがないことの2点で報告 (5) の場合の真実接触面によく似ている。いずれの場合にも、 μ は 0.1 程度である。

4. メタアクリル清浄面の場合

図版 II-(4)はメタアクリルの清浄面で摩擦された雪の摩擦面である。a は雪粒の平らな面で、この面から b, c の2本の細長い氷の棒が伸びている。氷の棒ののびた向は板の違った向と一致する。a の面や、他の雪粒の平面にも、摩擦の方向に平行なすじがみうけられる。

図版 II-(4)の雪粒の表面にみられる変形は非常に流動性に富んだ変形であるから、かりに流動変形と名付ける。流動変形の原因は2つ考えられる。雪粒表面の塑性流動によるものと融解によるものである。しかし、b, c の氷の棒が太さをもつことからみて塑性流動によるものではないであろう。金属の研磨の際におこる表面層の流動とおなじように、雪粒の表面が摩擦力によって流動したのであるならば、b, c は厚さのうすい、膜の形にのびると考えられるからである。したがって、写真にみられる氷の棒は、雪粒の表面が一度とけ、摩擦の方向に流された後凍結したものであろう。

図版 II-(4)はメタアクリル清浄面の実験のうちで、摩擦面に最もはげしい流動変形がみられた例である。しかし、この時記録装置の不備で、 f の記録はとれず、第1表にはかかげられていない。

図版 III-(5) は、第 1 表第 11 番の測定をおこなった時の摩擦面の写真である。a, b, c, d, e の平らな面は、雪粒の真実接触面で、これらの他にもいくつかの平らな真実接触面をみることができる。a の面には縁に氷の棒がつき、b, c の面には氷の粉がついている。ところが、d, e の面には縁に氷の棒がつくとともに、その表面の半分以上は、氷の粉でおおわれた。d, e の面がつくられた後に、他の雪粒で生産された氷の粉が移動してきて、d, e の面とメタアクリルの板との間に入りこんだのである。

a の平らな面があらわれている雪粒の右側の雪粒 f には、短い氷の棒が何本もついている。しかし、この粒子には、明瞭な形をした平らな面をみることができない。この f は、a の面をもつ雪粒と、写真の奥の方で一連の雪粒と太い柱で連絡されているために、氷の棒が出来た後に、 f の回転がおこったとは考えられない。 f についている氷の棒は、a から供給されたか、あるいは、 f 自身に一度平らな面ができ、その面が氷の粉によっておおいかくされたかであろう。

f のような場合は、同一の摩擦面の他の部分の写真、図版 III-(6) にもみられる。氷の棒 a が附着している粒がそれである。この雪粒の他、写真の上の方にも短い氷の棒が存在しながら、平らな面をはっきりとは認めえない雪粒が存在する。

報告 (5) において、真実接触面の数や面積を写真の上で求める試みをおこなった。真実接触面の形が明瞭に認められたからである。ところが、今回の測定においては、上にのべたように、氷の粉におおいかくされて、真実接触面がはっきりとは認められないものが多くなった。このため、真実接触面の数や面積の測定はおこなわれなかった。

図版 III-(6) の a の氷の棒には、棒を横切る線が入っていて、a の棒が小さな氷の集合であることがわかる。氷の棒 b は、摩擦の方向とは直角をなしている。氷の棒が摩擦の方向をとらない例は、他に 1 例をみることができたが、このような配置をとった理由は明らかではない。

5. メタアクリル・シリコン液ぬりの場合

図版 IV-(7) はシリコン液をうすくぬったメタアクリルで摩擦された雪の摩擦の写真である(第 1 表第 17 番)。a, b, c, d, e としたところに、平らな真実接触面をみることができる。氷の粉や、氷の棒が存在しないことは、シリコン液をぬった硝子の場合とおなじである。すなわち、硝子、メタアクリルの何れも、シリコン液をぬることによって、摩擦係数 μ にも、真実接触面の形にも殆んど差異を生じない結果をしめした。

6. 氷の棒、氷の粉の成因について

報告 (5) にものべたように、実験につかった雪の試料には端があり、抵抗 f と、 f を測定する装置が試料を引きとめている力 $-f$ とは、向が反対で、着力点が異なるため、雪には廻転モーメントが作用する。その結果、写真の上で、試料の左手の方が、右手の方よりも強く板におしつけられる。図版にかかげられた写真を試料全面について撮影してみると、試料の左手の方が右手の方よりも摩擦による変形をはげしくうけている。図版にかかげた写真は、主として試料の左手の方でとられたものである。

氷の棒は、試料の左手に多くあらわれ、右手の方に行くにしたがって、氷の棒は少なくな

り氷の粉が多くなる。すなわち、雪の試料のうちで、垂直荷重が左から右に連続的に少なくなつてゆくにつれて、雪粒に生ずる氷の棒は、連続的に氷の粉にかわるのである。III・4にのべたように、氷の棒は太さをもった棒で、うすい膜ではないから、雪粒の融解水が凍結したものであろうと考えられる。そして、氷の棒の生成条件と氷の粉の生成条件が連続的にかわることから、氷の粉も亦、III・1でのべたように、雪粒の表面の小規模な融解によるものではないかと推定されるのである。

メタアクリル清浄面の場合、氷の棒がみられたのは、 μ が大きい値をしめした場合で、 μ の値が小さい場合には、氷の棒は少なく、氷の粉の生産が多かった。一方、硝子の場合、清浄面では μ が大きいほど氷の粉の生産が多かった。しかし、硝子の清浄面とラッカーぬりの面では、 μ は清浄面の方が大きいのにに対して、氷の粉はラッカーぬり面の方に多くあらわれた。したがって、粉の生産量の多少によって、 μ の大小をきめ難いことになる。あるいは、Bowdenの述べているように、硝子よりも熱伝導率 k の小さいラッカー膜の存在することが、雪粒の小規模融解を促し、氷の粉の生産を多くしたのかも知れない。

文 献

- 1) 藤岡敏夫 1958 雪櫛の抵抗IV. 低温科学, 物理篇, **17**, 31-52.
- 2) 藤岡敏夫 1962 雪櫛の抵抗V. 低温科学, 物理篇, **20**, 159-179.
- 3) Bowden, F. P. and Tabor, D. 1954 The Friction and Lubrication of Solids. Oxford.
- 4) 木下是雄 1950 まさつの研究. 創芸社, 東京.
- 5) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77-96.

Résumé

In the previous paper the author reported the results of preliminary experiments made for the purpose of observing the microscopic changes which appeared on the surface of the snow in contact with a moving plate of glass. The further experiments carried out on the same line are described in this paper. The experimental device was the same as before; a block of compact snow with rectangular flat surface of 6 cm² was put on a rotating disc of glass or methacrylic acid methyl resin. After rotations of the disc for several minutes the snow was cut by the use of the aniline method into a thin section as it was stuck to the disc. The disc put under a microscope with the thin section on its bottom surface displayed the changes which had occurred on the snow surface. Besides such microscopic observations, the frictional force was registered by an electronic recorder during the rotation.

The photograph of Pl. I-1 illustrates the surface of snow in contact with a clean glass plate after rotation of 5 min at -2°C. The arrow indicates the direction in which the glass disc moved, also serving as the scale. Flat areas marked a, b, c, d, e and f are the actual areas of contact between snow and disc. The glass plate rubbed off the projections of ice grains of snow and left the scobs to the right side of the actual contact areas as

indicated by letters g, h and i. When a disc of glass coated with lacquer film was used, the actual contact areas became wider and more scobs were produced as illustrated in Photo. I-2. Almost all the ice grains are rubbed off and the spaces between them are filled up by the scobs.

Quite a different appearance marked the contact surface of snow when a disc of methacrylic acid resin was used. As illustrated in Photo. 4 of Pl. II, the actual contact areas are striped and have several ice sticks extending in the direction of motion of the disc. It is quite likely that the projecting ice grains melted and the melt water was drawn out by the rotating disc to be carried off thereafter. The ice sticks seen in the photograph are the frozen product of the water which was just being drawn out when the rotation was stopped.

It is a general belief that snow will become more slippery as more water is produced by friction at the contact surface; the water plays the role of lubricant. Then the frictional force would be smaller between snow and methacrylic resin than between snow and glass, because as stated above, much water appeared on the contact surface in the former case while no sign of water was seen in the latter one. But, contrary to the general belief, frictional coefficient μ was found to be greater with the resin than with the glass; μ between snow and resin was 0.61 while μ of snow against glass and the glass coated with lacquer film were respectively 0.30 and 0.13.

Silicon oil is effective in reducing the coefficient of friction; plates of glass and methacrylic resin coated with silicon oil (0.1 stokes) gave μ as small as 0.11 and 0.07 respectively. The contact surfaces in those cases are illustrated in Photo. II-3 (glass) and Photo. IV-7 (resin). There is no sign of melting of ice grains like that seen in Photo. II-4. Not any water but the silicon oil must have acted as lubricant in those cases.

