



Title	雪橇の抵抗 V : 積雪と板との平面摩擦 3
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio
Citation	低温科学. 物理篇, 20, 159-179
Issue Date	1962-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17988
Type	departmental bulletin paper
File Information	20_p159-179.pdf



雪 橇 の 抵 抗 V^*

— 積雪と板との平面摩擦 3 —

藤 岡 敏 夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 36 年 11 月受理)

I. ま え が き

筆者はさきに積雪と板との平面摩擦の研究として、雪橇の抵抗 II¹⁾、同 IV²⁾ を報告した。これら 2 つの報告に使用された板は、いずれも鉄の板であった。今回はメタアクリル酸樹脂の板の場合について報告する。簡単のため、上にのべた 2 つの報告を、それぞれ、報告 (2)、報告 (4) とよぶことにする。

スキーやスケートが雪や氷の上でよくすべることからもわかるように、雪や氷と木材、金属との間の摩擦は金属間の摩擦にくらべて、いちぢるしく小さい摩擦係数をしめす³⁾。Bowden⁴⁾ は、雪や氷の摩擦においては、温度が氷の融点に近いために、摩擦熱のために真実接触面の氷が容易にとかさされ、とけた水が潤滑剤の役目をするのであろうとのべている。雪と摩擦する物体が熱を伝えにくいものであれば、摩擦によって発生した熱のうち物体の方へ逃げる熱量は少なくなり、摩擦係数は小さくなるであろう。Bowden は 2, 3 の材質の模型のスキーをつかって実験した結果、摩擦係数と熱伝導率との間に、この関係があることをたしかめた。ところが筆者の実験では、報告 (4) にものべたように、鉄よりも熱伝導率が 1/300 も小さいメタアクリル酸樹脂が、鉄よりも大きい摩擦係数をしめた。しかし、報告 (4) では、メタアクリル酸樹脂を使った実験について充分のべる予猶がなかったので、今回それについてくわしくのべることにする。

II. 測 定 装 置

第 1 図は測定装置の写真で、報告 (4) に用いられたものとおなじ装置である。メタアクリル酸樹脂の平らな板から切りだされた輪が図の A とした所にとりつけられている。報告 (4) ではこの部分が鉄の輪になっていた。輪 A の平らな下面は廻転台にのせた雪 B におしつけられ、上の面は鉄板 C、中空の弾性管をへて三角形の鉄板 D に固定されている。(第 1 図ではベークライトの端子板のかげになって、弾性管はみえない。) 鉄板 D の 3 隅につけた 3 対の滑

* 北海道大学低温科学研究所業績第 602 号

車 E は、3本の支柱 F に鉛直に刻んだ案内溝に入り、装置全体は上下に動くが鉛直軸のまわりの廻転はできない。

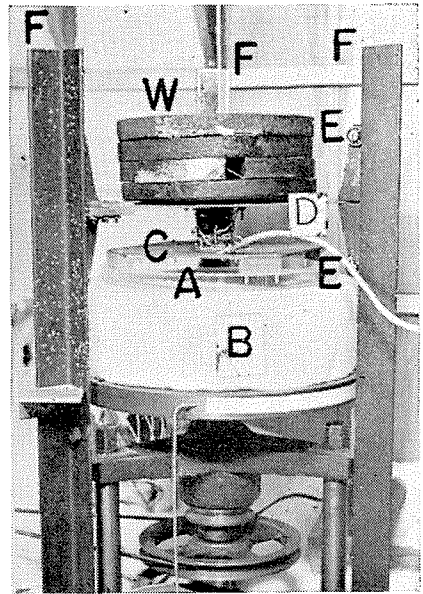
鉄板 D に錘り W をのせて輪 A を雪 B におしつけ、雪を廻転させると、輪は摩擦抵抗による廻転モメントをうけ、弾性管には振りの歪があらわれる。弾性管の筒面にはストレングージがはりつけられていて、振りの歪は電気抵抗の変化にかえられ、歪測定器をへて、電磁オシログラフで記録される。とくに摩擦速度がおそく、摩擦抵抗の変化がゆるやかな場合には、電磁オシログラフのかわりに電子管式ペン書記録器をつかった。

雪 B をのせた廻転台にはプーレーがとりつけてあって、革ベルト、減速歯車をへてモーターで駆動される。摩擦面の線速度 V は 10^{-5} cm/sec と 10^2 cm/sec の間であった。 V が 10^{-5} cm/sec よりもおそいところでは、プーレー面における革ベルトのクリープのために一定の V がえられない。それでそれ以下の V での実験はおこなわなかった。

メタクリル酸樹脂の輪 A は、外径 24.7 cm、内径 20.0 cm、厚さ 1 cm で底面積は 169 cm^2 で、報告(4)で使用された鉄の輪の底面積の 2.8 倍である。底面は成型された面のまま使用し、実験中時々アルコールでふき清浄に保った。なお、このアルコールで拭う際、輪は装置をおさめてある恒温箱の外にとりだした。アルコール蒸気が雪の粒子の表面に吸着され、粒子の表面をとかすのをおそれたからである。

輪には W によって 2.9 kg-wt から 24 kg-wt までの垂直荷重がくわえられた。輪の単位面積当りの荷重 w にすれば 17 gr-wt/cm^2 から 170 gr-wt/cm^2 までである。なお、スキーの w は平均 20 gr-wt/cm^2 、ふみかためない自然積雪でつかわれる樅の w は $100\sim 200\text{ gr-wt/cm}^2$ である。

雪は自然積雪から切りだしてつかった。報告(4)の場合とおなじくしまり雪で、密度 ρ も $0.27\sim 0.42\text{ gr/cm}^3$ の範囲にあって報告(4)の場合の $0.26\sim 0.49\text{ gr/cm}^3$ にほぼひとしい。はじめ、廻転台を電熱器であたためておき、雪をのせ、その下面を台に凍りつかせた。雪を廻転させながら、メタクリル酸樹脂の輪にとりつけた刃で雪の表面を徐々に削ると、雪の上面は輪の面と平行になる。削り屑の雪を刷毛でとり除き、清浄な紙をのせ、装置をおさめた恒温箱の中で半日以上放置した後に測定をおこなった。積雪を構成する氷の粒子の1つ1つは、平均3乃至4箇所での粒子と連結しあっている⁵⁾。刃で削られた雪の上面ちかくでは、この連結が損傷をうけるであろう。半日おけば、焼結現象によって、この損傷も回復する⁶⁾。



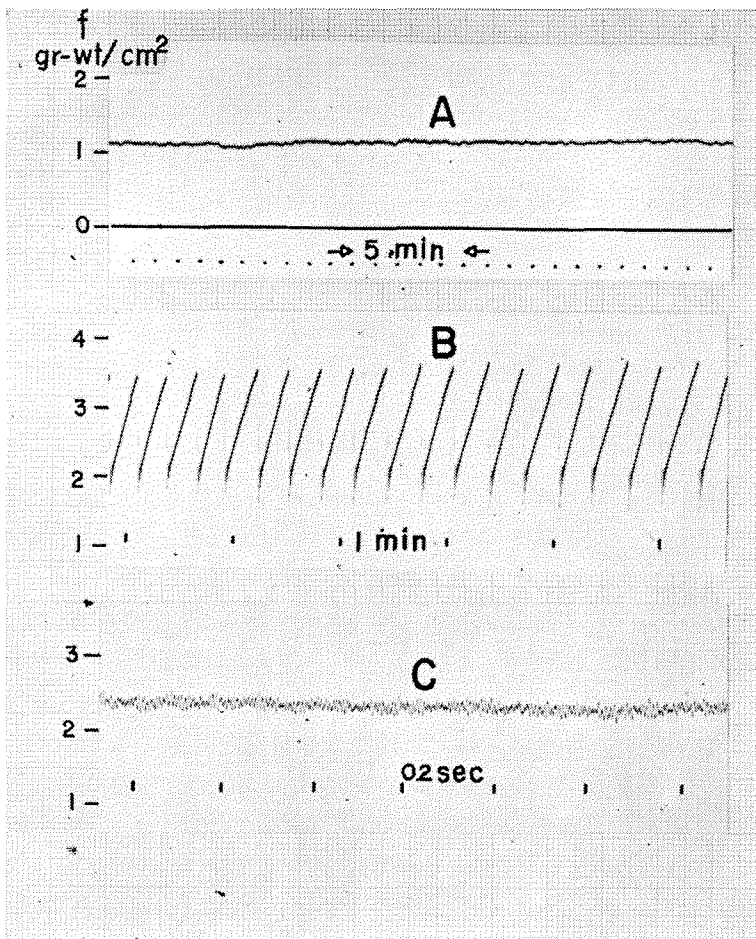
第1図 測定装置

摩擦の形式と摩擦係数

III. 摩擦抵抗の3つの型

報告(4)において、鉄の輪と雪との平面摩擦抵抗は、オッシログラムの上でA型、B型、C型と名づけた3つの型にわかれるとのべた。これら3つの型の特徴は、輪の単位面積当りの抵抗を f として;

A型 f は連続的に、且つゆるやかに変動する。摩擦速度 V の小さい時にあらわれる。



第2図 定常摩擦抵抗 f の3つの型。電磁オッシログラム。A型: 雪の温度 $T_s = -3^\circ\text{C}$, 雪の密度 $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, 摩擦面単位面積当りの荷重 $w = 17 \text{ gr-wt/cm}^2$, 摩擦速度 $V = 4.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 。B型: $T_s = -26.5^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $w = 118 \text{ gr-wt/cm}^2$, $V = 5.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 。C型: $T_s = -8^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $w = 17 \text{ gr-wt/cm}^2$, $V = 1.3 \text{ cm/sec}$ 。

B型 f は鋸歯状波をえがき、振幅は大きい。中程度の V の時にあらわれる。 -6°C 以上の温度ではあらわれない。

C型 f は短い週期で、不規則な小さな変動をつづける。 V の大きい時にあらわれる。

これらの3つの型の抵抗は、メタアクリル酸樹脂の輪についてもみられる。第2図に今回えられた3つの型の例をかかげてある。図の横軸は時間軸で左から右にすすみ、縦軸は抵抗 f である。図の説明にある摩擦速度 V は、輪の幅の中央の線速度である。

第2図にかかげたのは、いずれも、モーターをまわし始めてからある時間をへて、定常状態になった時の f の変化である。つぎに、これら3つの型の特徴をモーターのまわしはじめからしらべてみることにする。

IV. A型の抵抗

定常状態ではおなじく第2図のA型の抵抗になるとしても、モーターをまわしはじめた時の f 、すなわち初期摩擦抵抗には第3図にかかげた A_1 型と A_2 型との2つの型がある。図の横軸は時間軸、縦軸は抵抗 f である。

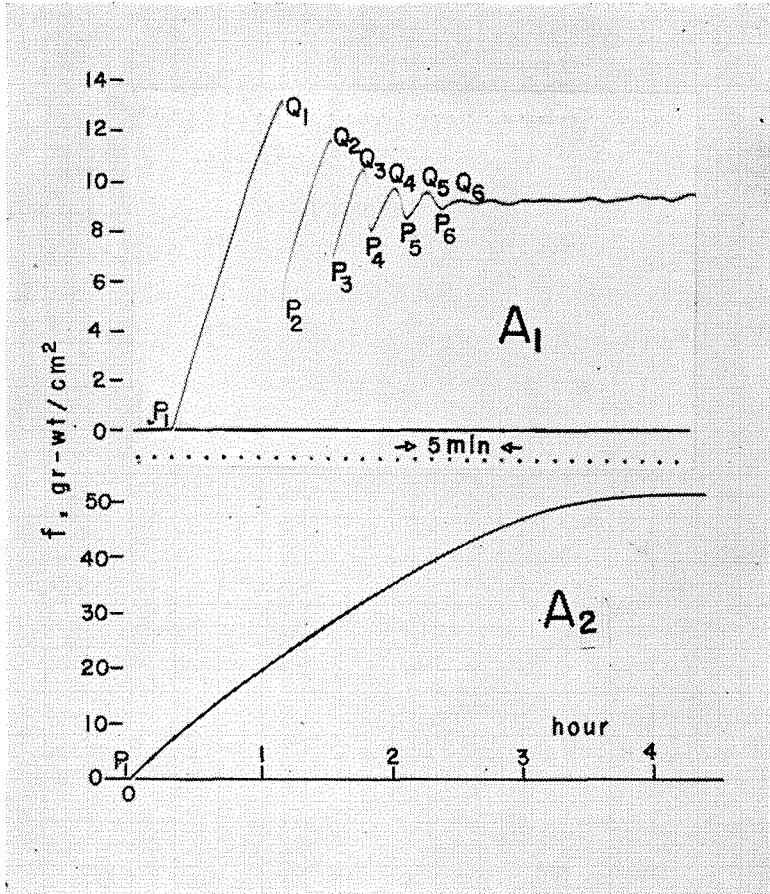
(a) A_1 型の初期摩擦

第3図 A_1 型のばあい、 P_1 点でモーターがまわりはじめるとともに、 f は増加して Q_1 点に達し、それから急激に P_2 点にさがる。 P_1 点から Q_1 点までは輪と雪との間に迂りはなく、輪は雪の上に止ったままである(モーターが廻転しているのに迂りがないのは、モーターと廻転台とをつなぐベルトが伸びているからである)。 Q_1 点から P_2 点までの急激な f の低下と同時に摩擦面で迂りがおこり、 P_2 点で迂りはとまる。 P_2 点から f は再び増加して Q_2 点にいたるあいだも迂りはなく、第2回目の f の低下とともに迂りがおこる。このような f の変化がくりかえされるが、 f の低下の幅は次第に減少し、 Q_6 点以後は第2図にしめした定常なA型の抵抗となる。

f の低下のしかたは第1回目、第2回目では瞬間的であるが、第3回目以後は次第にゆるやかになる。第3回目の Q_3 点から P_4 点までに0.2分、第4回目の Q_4 点から P_5 点までには0.7分を要し、 f の低下はもはや瞬間的とはいわれず、連続的減少である。

一方 f の増加の速さは、 P_1 点から Q_1 点、 P_2 点から Q_2 点、 P_3 点から Q_3 点まではほぼおなじ $0.47 \text{ gr-wt/cm}^2 \cdot \text{min}$ であるが、 P_4 以後はゆるやかになり、 P_4 点から Q_4 点までが0.24、 P_5 点から Q_5 点までが0.18、 P_6 点から Q_6 点までが $0.12 \text{ gr-wt/cm}^2 \cdot \text{min}$ である。モーターは一定速度で廻転しているから、 f のまし方がゆるやかになるのは、摩擦面は互いに附着してはいるが、同時に小さな迂りもおこるためとみなければならぬ。つまり、 $P_1 \rightarrow Q_1$ 、 $P_2 \rightarrow Q_2$ 、 $P_3 \rightarrow Q_3$ の増加には迂りがともなわれなかったが、 $P_4 \rightarrow Q_4$ で f の増加にすべりがともないはじめたわけである。それゆえ、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 点で与えられる f は最大静止摩擦抵抗 f_s であるといえるであろう。 Q_4 点以後の f は運動摩擦抵抗 f_k である。

また、摩擦面が固着、あるいはほぼ固着している時間 τ_i (P_i 点から Q_i 点までの時間)はし



第 3 図 初期 A 型抵抗。A₁ 型: $T_s = -3^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $w = 140 \text{ gr-wt/cm}^2$, $V = 4.9 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 。A₂ 型: $T_s = -26^\circ\text{C}$, $\rho = 0.27 \text{ gr/cm}^3$, $w = 120 \text{ gr-wt/cm}^2$, $V = 1.8 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$

だいに短くなり、それとともに Q_i 点が低くなる。このことは鉄の輪の場合にも観測され、 Q_i 点での f を w で割って、 Q_i に対応する運動摩擦係数 μ_i とすると、 μ_i と τ_i との間には次の式がえられた。

$$\mu_i = 0.11 + 0.12 \left(1 - e^{-\frac{\tau_i}{5.2}} \right) \quad T_s = -10^\circ\text{C}$$

$$\mu_i = 0.09 + 0.25 \left(1 - e^{-\frac{\tau_i}{2.3}} \right) \quad T_s = -16^\circ\text{C}$$

ただし τ_i の単位は分である。 $\tau_i = 0$ とした場合の μ_i の値、すなわち右辺の第 1 項は、輪と雪との間の間歇的なこりがおわり、定常的な摩擦になった時の摩擦係数である。すなわち定常運動摩擦係数は、摩擦面が固着する時間が非常に短くなった時の μ_i にひとしい。

メタアクリルの輪のいまの場合についても

$$\mu_i = 0.071 + 0.029 \left(1 - e^{-\frac{v_i}{2.1}} \right) \quad T_s = -3^\circ\text{C}$$

の関係がなりたつ。

137回の実験中、A型の定常摩擦抵抗があらわれたのは9例であった。そのうちの5例がA₁型の初期摩擦、4例がA₂型の初期摩擦を示した。第1表にこの9例のA型があらわれた時の実験条件がしめしてある。A₁型の初期摩擦は比較的高い温度 $T_s = -3^\circ\text{C}$ で $V = 4 \times 10^{-4}$ cm/secの時に限定され、他の温度、速度ではいちどもあらわれなかった。A₁型がみられた場合の比荷重 w は17~142 gr-wt/cm²で、実験で使用した w のほぼ全範囲にわたっている。報告(4)の鉄の輪の場合、A型の抵抗はつねに、A₁型の初期摩擦ではじまった。

第1表 A型の発生条件

初期摩擦の型	実験番号	温度 T_s °C	摩擦速度 V cm/sec	雪の密度 ρ gr/cm ³	荷重 W kg-wt	比荷重 w gr-wt/cm ²	全定常摩擦抵抗 F kg-wt	比定常摩擦抵抗 f gr-wt/cm ²	定常摩擦係数 μ_k
A ₁	1	-3	4.85×10^{-4}	0.42	24.0	142	1.7	11	0.071
	2	-3	4.47×10^{-4}	0.42	2.9	17	0.2	1.2	0.069
	3	-3	4.48×10^{-4}	0.42	15.9	94	0.87	5.4	0.055
	4	-3	4.52×10^{-4}	0.42	6.9	41	0.6	3.7	0.087
	5	-3	4.16×10^{-4}	0.42	11.1	66	0.83	5.1	0.075
A ₂	6	-26	2.74×10^{-5}	0.27	20.0	118	8.1	48	0.41
	7	-12	3.10×10^{-5}	0.27	15.9	94	6.2	37	0.39
	8	-12	3.66×10^{-5}	0.27	20.0	118	5.6	33	0.28
	9	-3	3.11×10^{-4}	0.34	19.1	113	1.65	9.8	0.086

(b) A₂型の初期摩擦

第1表、実験番号6番のA₂型の初期摩擦の記録を第3図に示した。P₁点でモーターを廻転させると、 f が増加しはじめるが、増加速度は極めて小さい。しかも、増加速度は徐々に減少して、3時間40分頃には0となり、 f は一定値をたもつようになる。この一定の f がA型の定常摩擦抵抗である。このように、A₂型の初期摩擦にはA₁型にみられたような減衰振動に似た f の変動や間歇的な迂りはみられない。

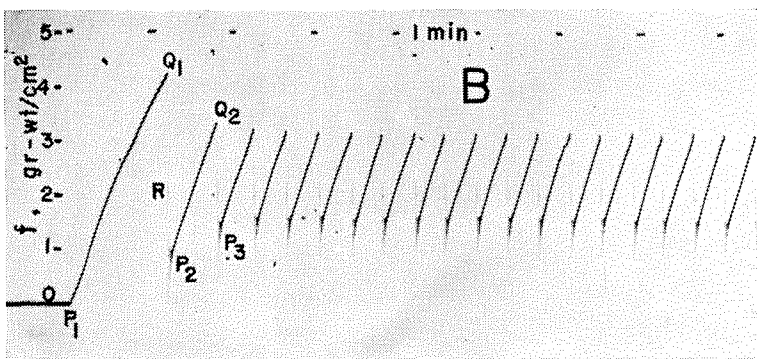
A₂型の初期抵抗があらわれるのは、第1表にしめしたとおり、A₁型の初期抵抗のばあいにくらべて、温度 T_s が低く、速度 V が1桁小さい場合である。そして定常運動摩擦係数 μ_k が特に大きいことが特徴である。ただ、例外として第9番の実験では、実験条件がA₁型があらわれる時の条件とほぼひとしい。この第9番の実験を除外して考えるならば、A₁型になる条件とA₂型になる条件との境界は、かなり明確なものと想像される。

木下⁷⁾は円筒形の雪を軸方向に圧縮して、雪があらわす反抗力に3つの型があることをみいだした。そして、それを塑性変形、破壊変形、第2種破壊変形の3つに分類した。これら3つの反抗力の型は、第2図の定常摩擦抵抗 f の3つの型とおなじである。A型が塑性変形、B

型が破壊変形，C型が第2種破壊変形に対応する。しかし，木下の場合，塑性変形の反抗力曲線は必ずA₂型ではじまり，A₁型はみとめられなかった。また反抗力の大きさは，塑性変形の場合が他の2つの反抗力のいずれよりも大きい。そして，上にのべたようにA₂型の定常運動摩擦抵抗は，A₂型にはじまるとき非常に大きい。このことからA₂型ではじまる摩擦では，雪が破壊をとまなわない剪断塑性変形をうけるものと考えられる。

V. B型の抵抗

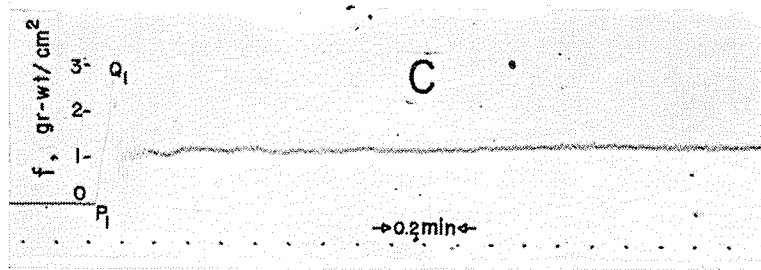
B型の抵抗は，第4図にしめしたように始まる。横軸は時間軸で，P₁点でモーターをまわしはじめると，縦軸の抵抗 f も同時に増加しはじめ，Q₁点に達した後 f は急激にP₂点にさがる。この時摩擦面が迂る。P₁点とQ₁点とのあいだでは迂りはない(先程ものべたように，この期間モーターと廻転台とをむすぶベルトがのびている)。P₂点の附近では記録の線がボヤけている。それはメタアクリル酸樹脂の輪が振りの減衰振動をするためで，鉄の輪の場合にもみとめられた。オッシログラフの紙送りを速くして，この部分を拡大すると， f が輪の固有振動週期(約1/100秒)の直線的減衰振動をしていることがわかる。つまり，メタアクリルの輪は，速度に無関係な摩擦抵抗をうけながら減衰振動をおこなう(文献(8), 29頁)。また， f はQ₁点からP₂点に低下する途中R点で一時停滞する。この停滞はあらわれることも，あらわれないこともある。鉄の輪の場合にも同様であった。比摩擦抵抗 f はP₂点からふたたび増加し，Q₂点にいたって再びP₃点まで急激に低下し，同時に迂りがおこる。以後おなじことがくりかえされて鋸歯状波のつらなりであるB型の定常摩擦抵抗になる。A型の抵抗のうちでも，A₁型の初期摩擦抵抗は，このB型の一つと考えることができる。B型は，すべて第4図のようにはじまり，A₂型ではじまることはない。



第4図 B型の抵抗。 $T_s = -14^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $w = 118 \text{ gr-wt/cm}^2$, $V = 5.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

VI. C型の抵抗

第5図は，比抵抗 f がC型の定常形をとるまでの経過である。横軸は時間軸，縦軸は f を



第5図 C型の抵抗。 $T_s = -4.5^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $w = 17 \text{ gr-wt/cm}^2$,
 $V = 1.3 \text{ cm/sec}$

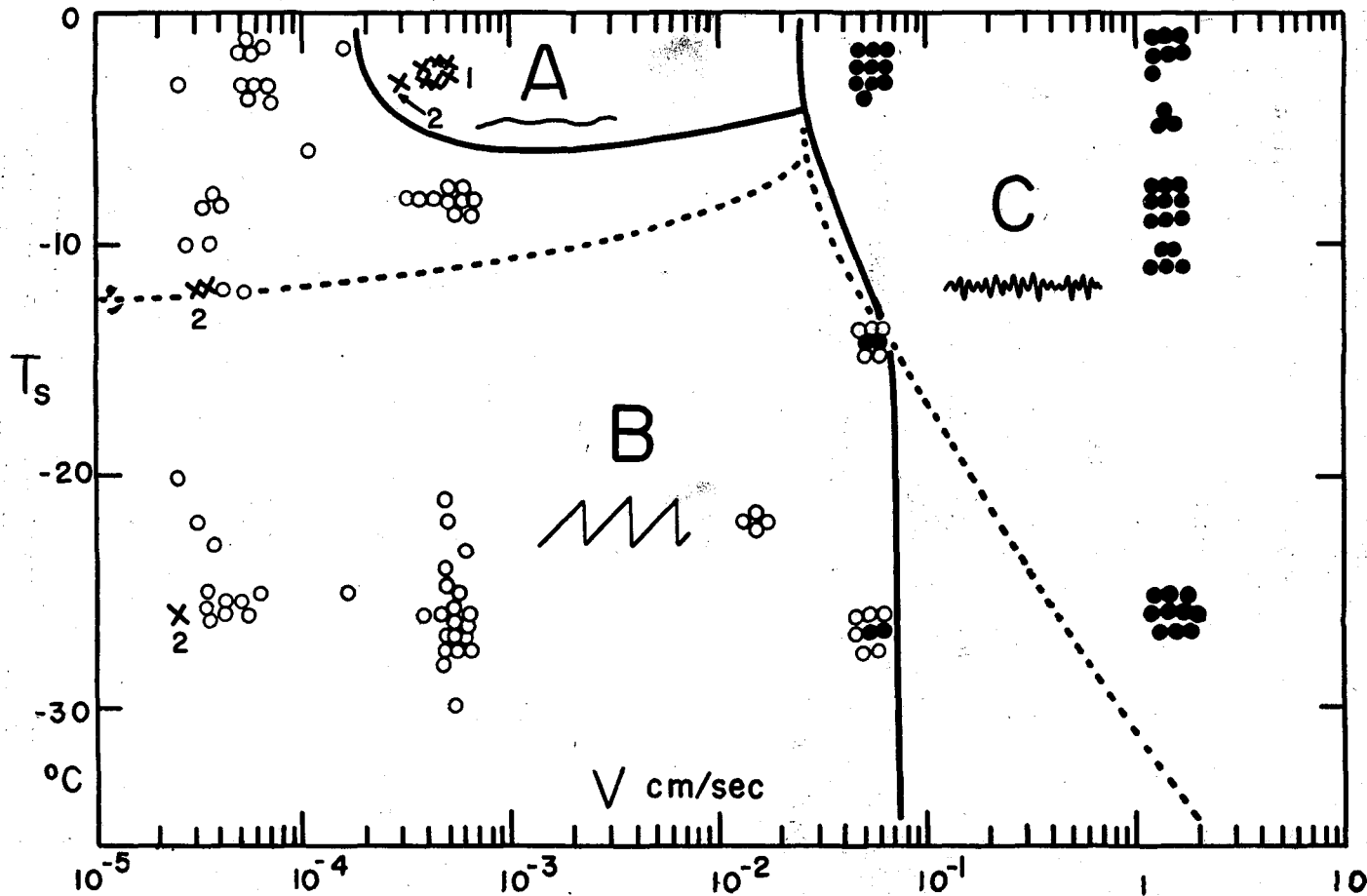
しめす。 P_1 点でモーターがまわりはじめると、抵抗 f も同時に増加し、 Q_1 点に達した後急激に低下する。この低下と同時に摩擦面の迂りがはじまる。 Q_1 点の直後 f の変動はかなり大きい、約 1/10 秒もすぎれば微細なものとなり、 f はほぼ一定の値をもつようになる。このメタアクリル酸樹脂の輪の場合と、報告(4)の鉄の輪の場合とで、C型の抵抗には特に異なる点はない。

VII. T_s - $\log V$ 面上における3つの型の分布

報告(4)で、鉄の輪にあらわれる3つの型の抵抗は、 T_s - $\log V$ (T_s は雪の温度、 V は摩擦速度) 面上で、一定の領域をしめることをのべた。メタアクリル酸樹脂の輪の場合についても同様で、第6図に3つの領域がしめしてある。図の横軸は $\log V$ で、縦軸は T_s である。×印はA型の摩擦をあらわし、 A_1 型ではじまったものには1、 A_2 型ではじまったものには2をつけた。○印はB型の摩擦、●印はC型の摩擦である。これらの印の1つ1つは、1回毎の実験結果をしめすもので、同一の T_s 、 V にいくつかの印がかたまっているのは、その T_s 、 V で、全荷重 W をかえて実験がおこなわれたことをしめしている。

3種の印はほぼ一定の領域をしめ、太い実線がそれら領域の境界となる。しかし、この境界線は数学的な不連続線ではない。例えば $V = 5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、 $T_s = -12^\circ\text{C}$ の点ではB型が5回、C型が2回おこった。おなじ T_s 、 V でもB型になったり、C型になったりするわけである。また、A型とC型とのちがいは、外見上は、 f の小さな振動週期の長短にみられるだけである。したがって、両者の区別をつけにくいこともある。たとえば、第6図で $T_s = -2^\circ\text{C}$ 、 $V = 5.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ の点にかたまっている10個のC型の摩擦抵抗は、第5図のC型摩擦抵抗よりも、変動の振幅が小さく、週期が長く、A型にちかい。すなわち、A型とC型との中間にある。さらに、 A_2 型ではじまるA型の摩擦が、B型の領域の奥深いところでみられることもある。しかし、以上のことから、各領域の境界が非常に不明瞭なものであると考えるのも正しくない。境界はかなり明瞭にきめられる。

第6図の点線は、比較のためにかき入れた鉄の輪の場合の境界線である。今回の場合の実線の境界線とかなりくいちがった部分もあるが、性質的にはおなじである。したがって、雪の



第 6 図 A 型, B 型, C 型の定常抵抗と T_s , V との関係。太い実線はメタアクリルの場合の 3 つの摩擦型の領域の境界線, 点線は鉄の輪の場合の 3 つの型の領域の境界線をしめす。

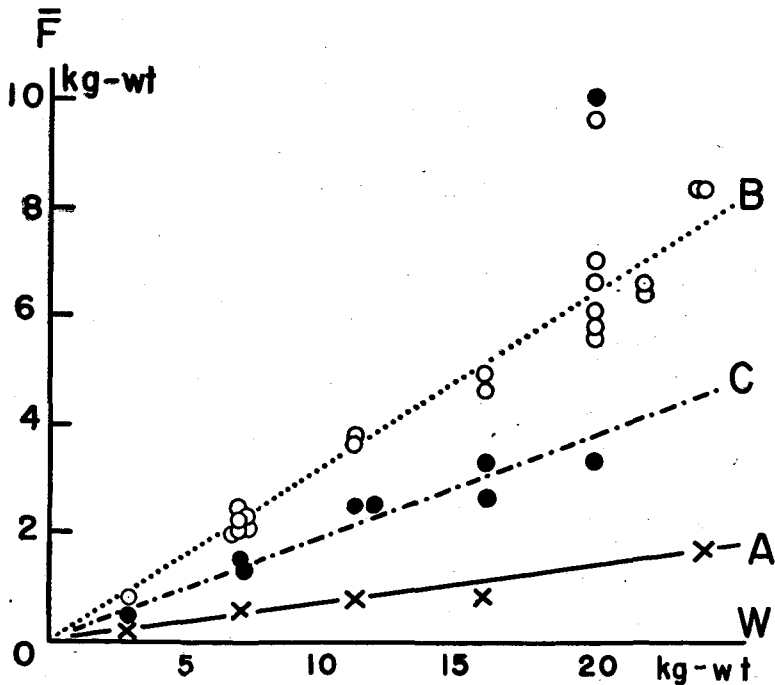
摩擦の相手の材質がことなれば、境界線に移動がおこるが、摩擦の型の領域そのものが入れかわることはないといえる。

鉄の輪の場合にくらべると、メタクリル酸樹脂の輪の場合の A 型の領域は非常にせまい。反対に B 型の領域は、鉄の輪の場合の A 型領域をとりいれて、いちぢるしく拡大した。C 型の領域は、 T_s の低いところで、境界線が V の小さい方に移動すると同時に鉛直になり、広がった。

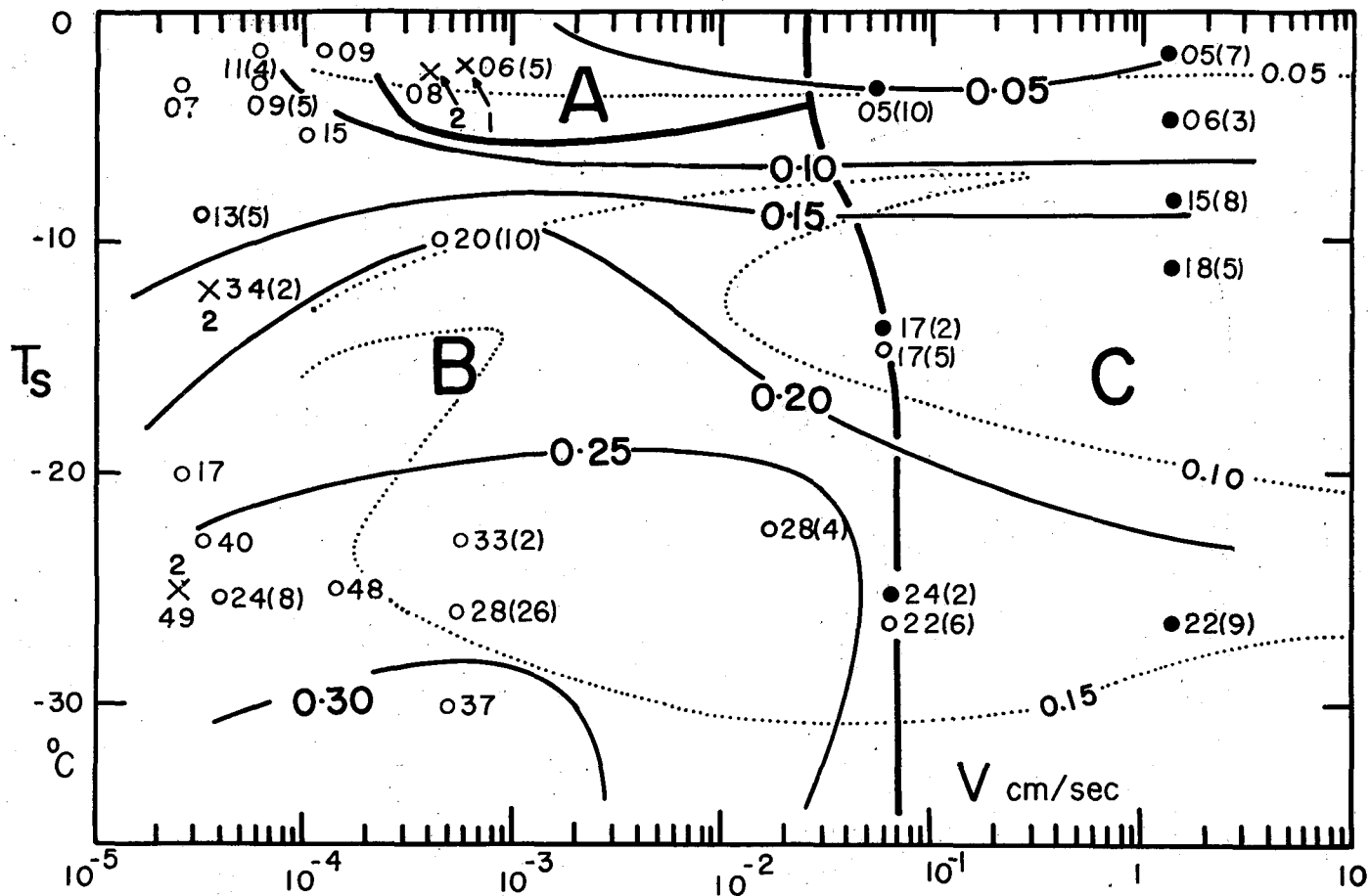
VIII. 運動摩擦係数

第 6 図のおなじ T_s , V でいくつかの印があつまっているところでは、全荷重 W をいろいろにかえて実験がおこなわれたとまえにのべた。この W と、オッシログラムからえられる輪の全面についての定常抵抗力 F との間に正比例の関係があれば、よく知られたアモントンの法則がなりたつことになる。

第 7 図に A, B, C の定常摩擦抵抗について、 F と W との関係をしめした。いずれの型の定常抵抗でも、全面抵抗 F は変動する。ことに B 型ではそれがはげしい。第 7 図の F は、変動する抵抗の平均値 \bar{F} である。



第 7 図 全荷重 W と摩擦抵抗力の平均 \bar{F} との関係。 A 型: $T_s = -3^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $V = 4.2 \sim 4.9 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$. B 型: $T_s = -23^\circ \sim -28^\circ\text{C}$; $\rho = 0.27 \sim 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $V = 1.6 \sim 5.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$. C 型: $T_s = -26^\circ\text{C}$, $\rho = 0.42 \text{ gr/cm}^3$, $V = 1.3 \text{ cm/sec}$



第 8 図 T_s - $\log V$ 面上における μ_k の分布。×は A 型，○は B 型，●は C 型の抵抗。数字は μ_k の小数点以下第 1, 2 位の数字。() 中の数字は平均をとった例数。太い実線は各型の領域の境界線，細い実線は等摩擦係数線をしめす。点線は鉄の輪の場合の等摩擦係数線。

第7図にみられるように、3つの型のいずれにおいても、 \bar{F} と W の間には正比例の関係がなりたっている。すなわち、一定の T_s 、 V の下で定常運動摩擦係数 $\bar{F}/W=\mu_k$ は W や w に無関係に一定になる。

IX. T_s - $\log V$ 面上における運動摩擦係数 μ_k の分布

運動摩擦係数 μ_k と T_s 、 V との関係をみるために、1つ1つの実験例についてもとめた μ_k を、 T_s - $\log V$ 面上に配置してみた。第8図がそれである。 μ_k はつねに小数なので、小数点以下第1位、第2位の数字をかきいれた。また、おなじ T_s 、 V でもとめられた μ_k がいくつもある時は、その平均値 $\bar{\mu}_k$ をかかけ、括弧の中に平均をとった例数をしめした。たとえば、13(5)は、おなじ T_s 、 V で W をかえておこなった5例の実験の μ_k の平均値が0.13であることをしめしている。

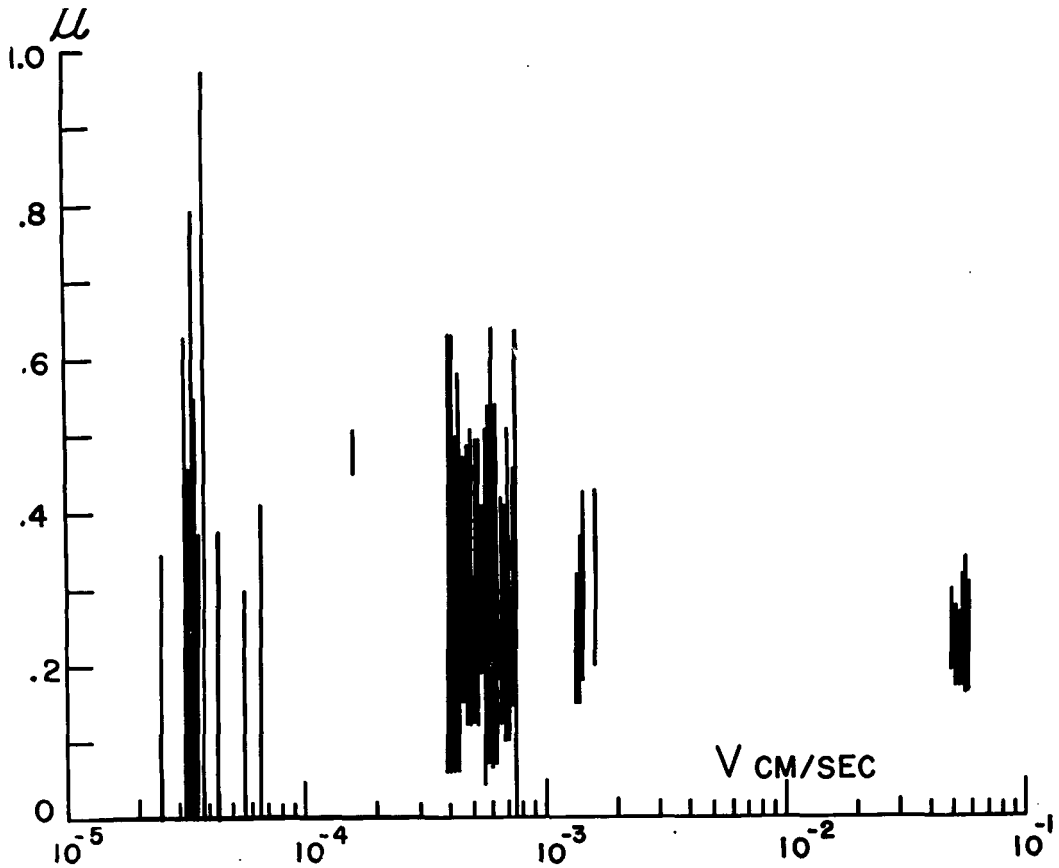
太い実線は3つの型の境界線で、細い実線は等摩擦係数線である。 $\mu_k=0.05$, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25の5本の等 μ_k 線がひかれている。全体として温度 T_s が低くなると μ_k がます傾向がある。ことに、 T_s が 0°C と -10°C の間では、等 μ_k 線は水平軸に平行で、 μ_k は V にはほとんど無関係に、 T_s の降下とともにます。しかし、 T_s が -10°C よりも低くなると、 V の影響があらわれ、おなじ温度でも V が小さくなると μ_k が増加する。

第8図にかきいれた点線は、報告(4)でえられた鉄の輪の場合の等摩擦係数線である。メタアクリルの輪の場合の等摩擦係数線にくらべて、かなり複雑な弯曲をしているが、 T_s が低くなると、 μ_k がふえることはメタアクリルの場合とおなじである。また、 T_s の低いところで、 V が小さくなると、 μ_k がます傾向は、鉄の場合にもみとめられる。 T_s の低下による μ_k の増加のしかたは、メタアクリルの方が大きい。 $\mu_k=0.05$ の線は、鉄の場合もメタアクリルの場合もほぼ一致している。鉄の $\mu_k=0.10$ の線は、中央部で右上に突出部をもっているが、その他の大部分は、メタアクリルの $\mu_k=0.20$ の線に近い。また、鉄の $\mu_k=0.15$ の線は大きく弯曲しているが、メタアクリルの $\mu_k=0.20$ と $\mu_k=0.30$ の間にある。したがって、 T_s の低下による μ_k のふえ方は、メタアクリルの輪の方が鉄の輪よりも2倍近くも大きい。

第6図で、B型の定常摩擦の領域に、 A_2 型の初期摩擦ではじまるA型の定常摩擦の例が3つあった。その摩擦係数を第8図によってみると、3例のうちのひとつでは0.49、他のふたつでは0.34である。これらの値は、おなじ V 、 T_s におけるB型定常摩擦係数の値にくらべるとかなり大きい。

X. B型の抵抗の摩擦係数と V との関係

第2図にしめしたように、B型の抵抗 f は極大値 f_{\max} と極小値 f_{\min} との間を鋸歯状に大きく変動する。今、メタアクリル酸樹脂の輪の単位面積当りの垂直荷重 w で、 f_{\max} 、 f_{\min} を割ったものをそれぞれ最大動摩擦係数 μ_{\max} 、最小動摩擦係数 μ_{\min} とする。この μ_{\max} 、 μ_{\min} と $\log V$ との関係を第9図にしめした。縦軸は μ_{\max} 、 μ_{\min} 、横軸は $\log V$ で、鉛直線分の上端と



第9図 B型の最大、最小動摩擦係数 μ_{\max} , μ_{\min} と V との関係。 $T_s = -20^\circ \sim -30^\circ \text{C}$ 。

下端とが、 μ_{\max} と μ_{\min} の値を表わす。温度 T_s は -20°C と -30°C の範囲にある。

縦の線分の長さは V が大きくなるにつれて短くなる。 f についていえば、 f の変動は V が大きくなるにつれて小さくなる。第6図にしめたように、 $V = 7 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 以上の V では、摩擦は f の変動の小さいC型である。このことからB型の摩擦は、 V の増加とともに連続的にC型の摩擦に移行するようにも考えられる。

V が小さくなるにつれて縦の線分の下端 μ_{\min} は次第に小さくなり、 $V = 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 以下の桁では0になった。一方、 μ_{\max} の方は V の減少とともに増大し、 $V = 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 以下の V では、実験毎にその値に非常に大きなちがいがあらわれる。B型の領域に属し、初期摩擦が A_2 型のA型定常摩擦があらわれたのもこの V のところであった。したがって、 $V = 10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$ を境にして、それ以下の V で新しい型の抵抗があるかも知れない。

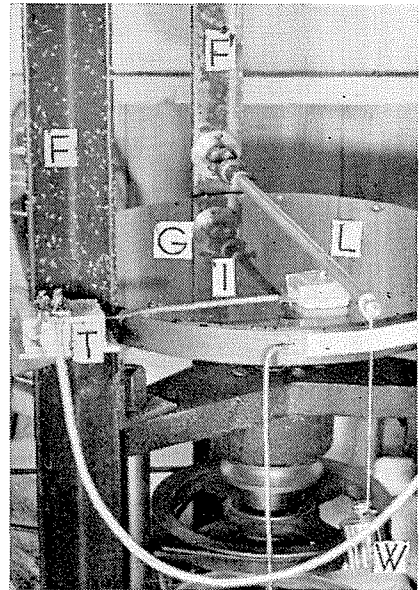
真 実 接 触 面

XI. 真実接触面の観察

雪と摩擦する物質の面は、その全面積で雪に接触するわけではない。雪と接触する真実の摩擦面は全面積のごく小部分にちがいない。雪と摩擦する物質が透明ならば、透明な輪をとおして顕微鏡でみることができる。鉄のような不透明な物質の場合は、そのような観察が困難である。それは、真実接触面は、雪の側からでなく、相手の物質の側からでないと、はっきり見えないからである。透明な物質をつかい、物質の側からみる場合でも、物質に雪のかたまりが接着した状態そのままでは接触面の観察はできない。雪を構成している小さな氷の粒子による光の乱反射のため、はっきりした像がつかれないからである。それで、筆者は透明な物質としてガラス板をつかい、摩擦によってガラス板に接着した雪をアニリン法⁹⁾を利用して接着面に平行にけずり、1 mm 以下の厚さにした。このようにすれば、雪による乱反射をとりさることができ。

第 10 図では、第 1 図の装置の雪をとりのぞき、代りにガラスの円板 G がネジで回転台に固定してある。G の上に長方形の雪のかたまりをおき雪の上にはジュラルミンの板を凍りつけた。雪は横秤 L と 錘り W によって荷重される。横秤 L の下側には凸起があつて、ジュラルミン板の中央の凹みにはまり L の一端は自在接手を経て支柱 F' に固定される。雪にはブリキ製の枠がはめられ、枠の一方からでた水平のヒレにあけた穴に、鉄の棒 I の曲げられた一端がはいつている。I の他の端は、支柱 F にとりつけられた線歪計 T につながり、この線歪計 T によって摩擦力が測定される。

ガラス板 G は、予めよく洗濯したガーゼに石鹼をつけて洗い、全面が水でぬれるようにしたのち、空气中で乾燥した。雪は密度 0.34 gr/cm^3 の自然積雪から切りとったもので、高さ 1 cm、底面は $2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ で長辺の方向に摩擦される。摩擦面に粗いサンドペーパーをかけ、刷毛で雪屑を払った後、罐に収めて実験の行なわれる -4°C の恒温箱の中に 2 時間以上入れておいた。



第 10 図 真実摩擦面形成装置

XII. 雪とガラス板との摩擦抵抗、雪の薄片の作製

恒温箱内 (-4°C) で、摩擦速度 $V=6.9 \text{ cm/sec}$ 、全荷重 $W=279 \text{ gr-wt}$ で 5 分間摩擦した。

単位面積当りの荷重 $w=46.5 \text{ gr-wt/cm}^2$ で、前章でのべたメタアクリルの輪の場合の w の範囲の中程にあたる。V はメタアクリルの場合の C 型領域の V にあたるが、この場合にも第 5 図の C 型の抵抗に似たオッシログラムがえられた。但し、週期 11 秒の変動が重畳されていた。この週期は、廻転台の廻転週期と一致するので、廻転ムラによるものと思われる。摩擦抵抗 F の平均値 $\bar{F}=100 \text{ gr-wt}$ で、 $\mu_k=0.36$ となる。第 8 図によると、この T_s , V のところではメタアクリルの μ_k は $0.07\sim 0.08$ で、鉄の μ_k は 0.06 程度である。したがって、ガラスの μ_k が最も大きく、鉄やメタアクリルの約 5 倍にもなっている。

理科年表によると、鉄の熱伝導率は、 $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ を単位として 0.2 、ガラスは 2×10^{-3} である。メタアクリル酸樹脂の値は掲載されていないが、ポリエチレンの $0.6\sim 0.8\times 10^{-3}$ 、ポリスチレンの $0.2\sim 0.3\times 10^{-3}$ 、エポナイトの 0.38×10^{-3} からみて、ほぼ 0.5×10^{-3} 程度であろう。すなわち、熱の伝え方は鉄が最もよく、ガラスがこれにつき、メタアクリルは最も熱を伝えにくい。一方 μ_k は鉄が最も小さく、メタアクリルがこれにつき、ガラスが最も大きい。これは熱伝導率の小さいものほど雪の上でよく進むであろうという Bowden の考えに反する。モーターをとめた後、楯秤、ブリキの杵をとりどき、ガラス板の上、雪のすぐ横へ、スポイトに入れた液体アニリンを注ぐ。純粋なアニリンは少し氷をとかすので、予め氷飽和にしておき、共融点 (-11.7°C) 以上のほぼ $-8^\circ\sim -10^\circ\text{C}$ で使用する。アニリンは毛細管現象によって雪に吸いこまれ、雪の組織の空隙に入っている空気とおきかわる。

雪をのせたまま、ガラス板を恒温箱からとりだし、 -30°C の低温室に放置し、アニリンの温度が下がったところで固体アニリンをふれて、過冷却をやぶってかたまらせる。金鋸の歯でジュラルミン板を切りはなし、雪を鉋で 0.5 mm 程度の厚さの薄片にした後 -10°C の部屋にうつす。表面のアニリンが少しとけた時にカバーガラスをかけ、雪の薄片のまわり、カバーガラスと回転ガラス板との間の隙間に水をしみこませて凍らせ、アニリンの蒸発、氷の粒の昇華を防ぐ。アニリンが全部とけて透明になったとき、ガラス板をうら返して顕微鏡でみれば、真実接触面の形状、箇数をすることができる。

XIII. 雪の試料に端があることによる効果

図版 I-1 は回転ガラス板に接着した雪の薄片を、摩擦の方向の全長にわたってとった拡大写真である。矢印は、ガラス板が雪に対して運動した方向をしめす。左右両端にみえている大きな氷は、薄片のまわりをふさぐ氷の一部である。

摩擦をうけた時、雪の試料の厚さは約 1 cm あり、その下面でガラス板から摩擦力 F をうけ、厚さの中程で線歪計にひきとめられる。そのため、摩擦力と線歪計とは雪の試料に回転モメントを与え、その結果試料の前方(ガラスが試料にむかってくる側)は下におされ、後方はうきあがろうとする。雪とガラス板との圧力は前方で大きく、後方で小さい。しかし、雪の試料の厚さは前方でも後方でもおなじで、巨視的な密度が試料の部分によってかわることはない。ところが、図版 I-1 のガラス面に接着した雪の薄片では前方(左方)で密度が高く、後方(右方)

では小さい。よって、摩擦は、摩擦面での圧力が大きいと摩擦面に接する雪の薄片の密度を高める作用があるといえることができる。

このような摩擦面に加わる垂直圧力の不均一性は、端のある試料を使うかぎりさけることが困難で、この不均一性をのぞくには、前章でのべたような端のない輪の形をした試料を使わなければならない。

XIV. 真実接触面の状況

図版 I-2 は、図版 I-1 の圧力の小さい右手の部分の高倍率顕微鏡写真である。a, b とかき入れたところに、長円形と矩形に近い平らな面がみえ、これら 2 つの面が真実接触面であったと想像される。

図版 I-1 の中央からやや右よりのところとった高倍率顕微鏡写真が図版 I-3 である。左肩の c としたところに、長円形やヒョウタン形をした平らな面が 9 つみえ、その左上には d としたところ、もう少し広い面がみえる。氷の粒子の表面が、ゆるやかな起伏をもちながらもガラス面にはほぼ平行になっていたために、摩擦によって高い所が平らにされ、このような形の真実接触面ができたのであろう。

図版 II-4 の写真は、図版 I-1 のほぼ中央でとられたものである。e としたところに不規則な形をした真実接触面がみえ、円形や不規則な形の模様が見える。顕微鏡の鏡筒を上下して焦点面をずらしてみると、この模様は凹みであることがわかる。図版 I-3 の c のバラバラに離れていた小さな真実接触面の群が、摩耗がさらにすすんだために面積をひろげ、互いに連絡しあったものであろう。

図版 II-4 よりもさらに左手でうつした写真が図版 II-5 である。g としたところに真実接触面があり、面の中には円形又は長円形の模様が見える。これらの模様も凹みである。II-4 の写真よりもさらに摩耗がすすみ、不規則な形をしていた平面内の模様が、くびれた所で切断され g の模様になったと考えられる。

図版 II-5 よりもさらに左手の方には、II-5 の g よりも面積の広い平らな面が数多くみられる。同様に円形、あるいは長円形の模様があり、その大きさ、分布密度も、図版 II-5 の真実接触面 g のばあいとあまりかわらない。

図版 I-2 に入れたスケールと雪に対するガラス面の運動方向をしめす矢印は、その後の写真にも共通である。図版 I-1 の雪とガラスとの全接触面では、ガラスの運動をむかえる前方と、ガラスが雪から去ってゆく後方とで雪の密度に大きな差がみられたが、個々の真実接触面においては、前方と後方とで、真実接触面の形や内部の模様に差異はみとめられない。また、偏光顕微鏡でみるかぎりでは、真実接触面をもつ氷の粒子は単結晶であり、真実接触面は、単に氷の粒がけずられてできたものにすぎない。

XV. 真実接触面の面積

図版 I-2 から II-5 までにしめたような顕微鏡写真を、雪の資料の見掛けの接触面全体について撮影して、真実接触面の数をかぞえたら、資料の底面積 6 cm^2 内に 190 個あった。写真にトレーシングペーパーを当てて真実接触面の形を画き、切りぬいて目方をはかる方法で真実接触面の総面積 S_e を求めたら、 $S_e = 8.35 \text{ mm}^2$ になった。雪の見掛けの接触面 $S_s = 6 \text{ cm}^2$ の 1.4% である。

密度 ρ の積雪を任意の面で切断したとき、その全切断面積 S_s のうち氷がしめる部分の面積を S_i とすると、

$$\frac{S_i}{S_s} = \frac{\rho}{\rho_i}$$

の関係がある。 ρ_i は氷の密度 0.92 gr/cm^3 である。実験につかた雪の密度は $\rho = 0.34 \text{ gr/cm}^3$ であるから、 $S_i/S_s = 37\%$ である。 S_i は、雪およびガラスの摩擦面が幾何学的に平面であるとした場合の氷とガラスの接触面積である。この面積をかりに幾何学的接触面積とよぶことにしよう。そして、真実接触面積と幾何学的接触面積との比を有効接触率 β ということにする。この実験の場合、幾何学的接触面積 S_i は見掛けの接触面積 S_s の 37%、真実接触面積は S_s の 1.4% であるから、有効接触率 β は 3.8% である。雪のように多孔質でない金属の板同志の摩擦の場合には、見かけの接触面積と幾何学的接触面積とはおなじで、 β は 0.1 あるいは 0.01% である。したがって、雪の場合 β はそれにくらべると非常に大きいといわなければならない。うえの実験では、速度 $V = 6.9 \text{ cm/sec}$ で 5 分間摩擦した。したがって、真実接触面にふれたガラスの長さは 207 m である。もっと長く摩擦すれば、真実接触面の面積が増加して、 β は 1 に近づくかもしれない。雪の試料にくわえられた全垂直荷重 W は 279 gr-wt であった。よって、真実接触面には平均して 3.3 kg-wt/cm^2 の垂直圧力がくわえられていたことになる。オッシログラムに記録された全抵抗力 F は 100 gr-wt であった。したがって、真実接触面に対しては平均 1.2 kg-wt/cm^2 の抵抗力になる。若浜¹⁰⁾ は氷を圧縮し、氷の臨界剪断応力としてはほぼ 200 gr-wt/cm^2 の値をえた。雪とガラスの摩擦の場合、真実接触面附近では、氷の剪断応力は臨界剪断応力を十分にこえている。

真実接触面の面積は 8.35 mm^2 、個数は 190 であるから、1 個当りの面積は平均 $4.4 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ である。今真実接触面がすべて円形で、面内に図版にみられたような模様のない凹所がないと仮定すると、平均半径 \bar{r} は 0.12 mm となる。

0°C 附近の氷は強い塑性をしめすので、ガラスと雪とを摩擦させず、雪をただガラス面におしつただけでも真実接触面があらわれるであろう。まえとおなじ密度 0.34 gr/cm^3 、前とおなじ温度 -4°C で、おなじ荷重のもとに静止したガラス板に 5 分間雪をおしつけておいた。その結果、図版 I-2 の a, b にみられるような平らな真実接触面があらわれた。面の数は 162 個で、ガラス板を廻転させ摩擦をおこなわせた時よりもわずかに少ない程度である。しかし、真

実接触面の総面積は 0.95 mm^2 で、摩擦させた時にくらべてはるかに小さく、その $1/10$ である。したがって、うえにえた有効接触率値 $\beta=3.8\%$ は摩擦自体によるものと考えて、事実上さしつかえない。

XVI. 氷の融解に対する考察

(1) 雪にくわわる垂直圧力による融解

Reynolds⁹⁾ は氷の上でスケートが通りやすい理由として、スケートの刃によって圧力をうけた氷が、圧力による融点降下のためにとけ、とけて生じた水が潤滑油の役目をするためであろうと述べている。ガラス板と接触している雪の真実接触面には、平均 3.3 kg-wt/cm^2 の垂直圧力がくわわっていた。この圧力による雪の融点降下を次に考えてみる。

Reynolds は Clausius-Clayperon の式で氷の融点降下の値をさだめたが、それは正しくない。氷にくわわる力は静水圧でもないし、また、かりに静水圧にちかいても、氷にかかる圧力ととけた水の圧力がひとしくないのである。吉田¹¹⁾ がのべているように、 σ_z なる垂直応力をうけた氷の面の融解点は

$$\Delta T = \frac{T}{\lambda} v_i \sigma_z$$

だけかわる。 T , λ , v_i はそれぞれ、氷の絶体温度、融解熱、比容積である。 σ_z は圧力の時に負、張力の時正の符号をとる。 $T=273^\circ$, $\lambda=79.7 \text{ cal/gr}$, $1 \text{ cal}=42.7 \text{ kg-wt}\cdot\text{cm}$, $v_i=1.09 \text{ cm}^3/\text{gr}$ であるから、 σ_z を kg-wt/cm^2 であらわすと

$$\Delta T = 0.087 \sigma_z$$

となる。

ガラス板と接触している雪の真実接触面では、 $\sigma_z = -3.3 \text{ kg-wt/cm}^2$ であるから $\Delta T = -0.29^\circ$, ほぼ -0.3° である。すなわち、真実接触面における氷の融解点は -0.3°C である。それに対し、実験は -4°C でおこなわれたのであるから、真実接触面で氷の融解がおこったとしても、それは圧力による融点降下によるものではない。

第I章のメタアクリルの輪の場合も、単位面積当りの荷重 w は、今のガラス板の場合とおなじ程度であり、雪の温度 T_s は -2°C 以下であったから、やはり融点降下による融解はおこらなかつたと考えてよい。しかし、さきののべた静止したガラス板の上に、全荷重 279 gr-wt で雪を5分間おしつけた場合には、真実接触面積が小さいため、 σ_z が -29 kg-wt/cm^2 という、絶体値の大きなものとなり、融点降下は -3° にも達する。すなわち、実験温度 -4°C に近い。よって、雪とガラス板との摩擦実験で、摩擦の初期の真実接触面の小さいときには融点降下の影響もかなり大きいものと考えられる。

(2) 摩擦熱による雪の融解

図版 I-2 から II-5迄の写真を見ると、真実接触面があらわれた氷の粒子は、はじめから雪

の表面に面していたものと判断される。表面の摩耗がすすんだために、内部の粒子が表面にあらわれたとは考えられない。ここで、摩擦が開始されてから写真の状態になるまでに、どれほどの氷が真実接触面において失われたかを推定してみよう。

真実接触面のあらわれた氷の粒子の最初の形がどのようなものであったかは正確に知ることとはできないが、それをつぎのようなものであったと想像しても、だいたい、よいであろう。写真の真実接触面の形を、前節でもとめた平均半径 \bar{r} の円とみなし、この円の上に、はじめ、おなじ半径 \bar{r} の氷の半球があったとする。すると、摩擦によって失われた氷の質量 m は

$$m = \frac{2}{3} \pi \bar{r}^3 \rho_i N$$

となる。ただし、 ρ_i は氷の密度、 N は真実接触面の数である。 $\rho_i = 0.92 \text{ gr/cm}^3$ 、 $\bar{r} = 0.12 \text{ mm}$ 、 $N = 190$ を入れると、 $m = 6.32 \times 10^{-4} \text{ gr}$ となる。

今この真実接触面で失われた氷 $m \text{ gr}$ が、摩擦熱のためにとかされたと考えて、氷 $m \text{ gr}$ をとくために費されたエネルギー E_m をもとめてみよう。氷のはじめの温度を $T^\circ\text{C}$ 、比熱を c 、融解熱を λ とすれば、 $E_m = m(-cT + \lambda)$ である。 $c = 0.49 \text{ cal/gr}\cdot^\circ\text{C}$ 、 $T = -4^\circ\text{C}$ 、 $\lambda = 79.7 \text{ cal/gr}$ 、 $1 \text{ cal} = 42.7 \times 10^3 \text{ gr}\cdot\text{wt}\cdot\text{cm}$ を入れると、 $E_m = 2.2 \times 10^3 \text{ gr}\cdot\text{wt}\cdot\text{cm}$ となる。

一方、雪の試料を、 F の抵抗力に抗して速度 V で t 時間こらせるために費されるエネルギー E_a は FVt である。 $F = 100 \text{ gr}\cdot\text{wt}$ 、 $V = 6.9 \text{ cm/sec}$ 、 $t = 5 \text{ 分}$ であったから、 $E_a = 2.0 \times 10^5 \text{ gr}\cdot\text{wt}\cdot\text{cm}$ である。 $E_m/E_a = 1.1\%$ となり、真実接触面が、摩擦熱によって氷がとかされたためにできたものであるとしても、そのために消費されるエネルギーは、雪をこらせるために消費される全エネルギーの 1% 程度にすぎないことになる。

摩擦熱はうえにのべた E_m ばかりでなく、ガラス板や氷、空気の方へにげる熱量もふくんでいる。また、 E_m の計算には、仮定をふくみ、決して正確なものではない。しかし、 E_m の値が、摩擦に消費される全エネルギーにくらべて、極端に小さい結果になったことは注意すべきであろう。

文 献

- 1) 藤岡敏夫・疋田裕 1954 雪櫃の抵抗 II. 低温科学, 物理篇, **13**, 37-47.
- 2) 藤岡敏夫 1958 雪櫃の抵抗 IV. 低温科学, 物理篇, **17**, 31-52.
- 3) Reynolds, O. 1901 On the Slipperiness of ice, Scientific Papers, Vol. II.
- 4) Bowden, F. P. and Tabor, D. 1954 The Friction and Lubrication of Solids. Oxford.
- 5) 木下誠一 1960 積雪層の組織の変態過程. 低温科学, 物理篇, **19**, 111-118.
- 6) 黒岩大助 1960 積雪の Ice-Bonding にともなう弾性率, 内部摩擦の変化, ならびに氷の焼結機構に関する研究. 低温科学, 物理篇, **19**, 1-36.
- 7) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学, 物理篇, **19**, 135-146.
- 8) 荻原尊礼 1945 振動測定. 宝文館. 東京.
- 9) 木下誠一・若浜五郎 1959 アンリソ固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77-96.
- 10) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について. II. 低温科学, 物理篇, **20**, 77-100.

- 11) 吉田順五 1962 ひずんだ氷の飽和水蒸気圧と融解点とに関する熱力学理論. 低温科学, 物理篇, **20**, 29-56.

Résumé

In the former paper (reference (2)) the author reported results of experiments made on the friction between snow and a plate of iron; in this paper experiments made on the friction between a plate of methacrylic acid resin and snow will be described. The experimental device was the same as before; an annular plate of methacrylic acid resin was put on a rotating disc of snow and the frictional force between them was recorded by an electromagnetic oscillograph (Fig. 1). As stated in the former paper the kinetic friction between snow and an iron plate could be divided into three types which the author named A, B and C. Those three types were also found in the friction between resin and snow of the present experiment as shown in Fig. 2 by the oscillograms of the specific force of friction f (=force of friction/area of plate). Type A oscillogram is continuous, that of type B is saw-toothed and that of type C is characterised by small irregular fluctuations.

Which type would be formed depends on the frictional speed V and the temperature T_s . On the T_s - $\log V$ plane of Fig. 6 A-, B- and C-types are indicated respectively by crosses, light circles and solid circles; the plane is divided by thick lines into three regions in each of which only either A, B or C falls. The dotted lines are the border lines of the three regions as determined in the previous experiments on the friction between snow and an iron plate. The coefficient μ_k of kinetic friction, the mean value of f divided by the pressure on the interface of the resin and the snow, is shown by the curves with numerals such as 0.25, 0.30 on the T_s - $\log V$ plane of Fig. 8, together with the dotted curves which give μ_k between iron and snow. Those curves show that μ_k is generally twice as large in the case of resin and snow as in the case of iron and snow. This is against the general belief that an insulator of heat would be more slippery on ice and snow than a conductor of heat is. (The coefficient of thermal conductivity of methacrylic acid resin is about 0.5×10^{-3} cal/cm \cdot sec \cdot °C while that of iron is 0.2 cal/cm \cdot sec \cdot °C.)

In order to see the actual contact surface between snow and a solid plate, a block of snow with rectangular flat surface of 6 cm² was put on a rotating disc of glass. After rotation of five minutes at the speed of 6.9 cm/sec and at the temperature of -4°C, the snow was cut into thin section as it was stuck to the disc by the use of the aniline method (9). Pl. I-1 is a microphotograph of the thin section taken from the side of the glass, the arrow indicating the direction in which the glass disc had moved. Pl. I-2 and 3 and II-4 and 5 are microphotographs of a larger magnification taken at points of thin section of Pl. I-1. The small white areas marked a, b, c, d, e and g are the actual contact areas of snow which came out due to the removal of projections by the friction. The surface of actual contact of ice particles with glass were counted to be 190 in number and 8.35 mm² in total area. The load applied to the block of snow was 279 gr-wt and the frictional force was 100 gr-wt, which means that the normal stress and the tangential stress on the actual contact areas of ice particles were 3.3 kg-wt/cm² and 1.2 kg-wt/cm² respectively. The total

energy expended to overcome the frictional resistance through the whole course of the experiment of five minutes was equal to 2.0×10^5 gr-wt·cm.

The projections removed by the friction at the actual contact areas may be supposed to have been of nearly hemispherical forms with the same radii as those of the contact areas. Then the total mass of ice removed comes to be 6.32×10^{-4} gr. The thermal energy necessary to melt this amount of ice is 2.2×10^3 gr-wt·cm which is only 1 per cent of the above stated total energy expended.

