HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪橇の抵抗　Ⅳ：（積雪と板との平面摩擦　２）
Author(s)	藤岡, 敏夫
Citation	低温科學. 物理篇, 17, 31-51
Issue Date	1958-12-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/17942
Type	bulletin (article)
File Information	17_p31-51.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tosio HUZIOKA 1958 Studies on the Resistance of Snow Sledge IV. (Friction between Snow and Iron Plate 2). *Low Temperature Science, Ser. A*, **17**. (With English résumé p. 49)

雪　橇　の　抵　抗　IV*

(積雪と板との平面摩擦 2)

藤　岡　敏　夫
(低温科学研究所　応用物理部門)

(昭和33年7月受理)

I. まえがき

スキーや橇が辷る時，雪からうける抵抗には2種類の抵抗がある[1]。第1の抵抗は橇の弯曲した頭部のうける抵抗で，第2の抵抗は平らな底面のうける抵抗である。第1の抵抗は雪を破壊して橇の下に圧縮するためにうける抵抗で，第2のものは，この雪と橇の平らな底面との間にあらわれる平面摩擦抵抗である。これからのべる報告は，この第2の抵抗に関するものである。

橇やスキーには端があるから，必ず上に第1としてのべた抵抗があらわれる。したがつて第2の平面摩擦だけをしらべるためには，端のない板を用いなければならない。その方法として，筆者は板を円い輪に切りとり，これを廻転する雪の面におしつけた。輪には摩擦抵抗による廻転モメントがあらわれるから，廻転モメントを測定することによつて，平面間の摩擦抵抗を知ることができる。この方法による雪の摩擦抵抗の研究は，だいぶ以前から行つているのであつて，結果の一部はすでに報告した[2]。しかしその時は測定器の関係で，摩擦抵抗の平均値のみの測定にとどめた。今回は，摩擦抵抗の細かい変動を中心として報告する。前回とおなじく，鉄の輪を主として用いたが，補助としてメタクリル酸樹脂製の輪も使つた。

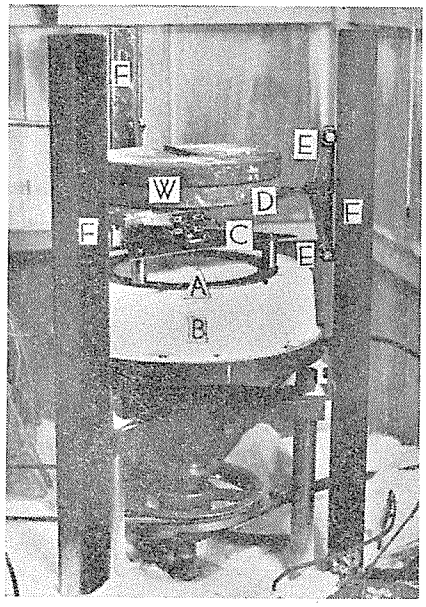
橇やスキーのばあいに限らず，雪と他物体との摩擦が問題となるばあいはいろいろある。たとえば，道路や飛行機滑走路の雪をローラーで圧しかためるばあい，ローラーと雪との摩擦が小さすぎると，雪はローラーの下にくりこまれないで，ローラーの前に堆積されるだけになる。いうまでもなく，これでは圧雪の効果はない。

II. 測定装置

第1図は測定装置の写真である。前回の報告[2]の装置よりも全体が丈夫に作られているが，原理的にはおなじである。鉄の輪Aが廻転台にのせてある雪Bにおしつけられる。輪Aは三角形の板Cに固定され，Cは中空の燐青銅の管—弾性管—を介して錘りWをのせた板Dにつ

* 北海道大学低温科学研究所業績　第447号

ながつている。(写真では，ベークライトの端子板のかげになつて，弾性管はみえない。) 板Dは，滑車Eを介して，三本の柱Fにそつて上下に自由にうごくことができるが，鉛直軸のまわりの廻転はできないようになつている。したがつて，板Dに錘りWをのせれば雪に圧力がかかるが，輪Aが雪との摩擦で廻転モメントをうけると，弾性管には摩擦抵抗に比例する捩りの歪があらわれる。この歪を線歪計[3]で測定，記録したのである。



第1図 測定装置

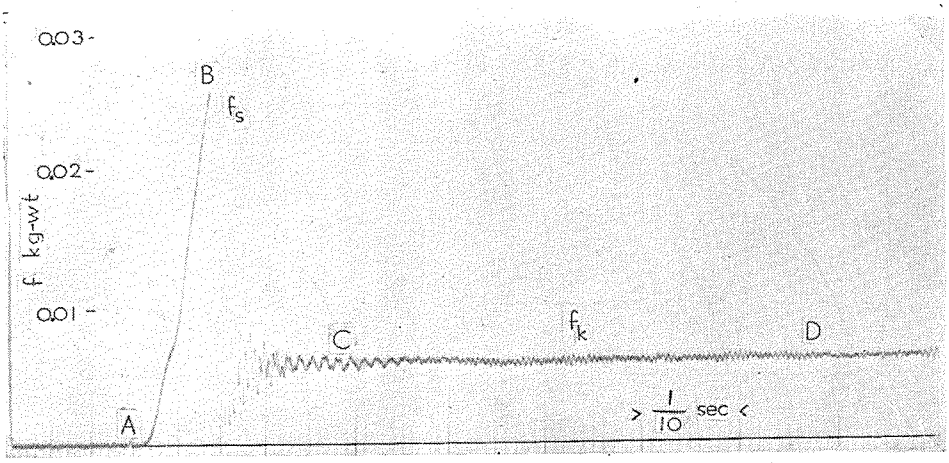
弾性管には次のように線歪計のゲージを貼つた。管が捩じられると，管壁にそつて，管の中心軸に45°の角度をなす，互に直角な2つの方向に最大の伸びと縮みがあらわれる。したがつて，この2つの方向に，2対(4枚)の直線型ゲージをはりつけ，ブリッジを構成すれば，管の歪みを最も感度よく求めることができる。ゲージにはトルク測定用として製作市販されている共和無線のKF-15を用いた。細長い矩形のフィルムベースの上に，上下2列14個宛のゲージが印刷配線されていて，矩形の長辺に対して，上の列は＋45°，下の列は－45°傾き，互に直角をなしている。このフィルムを管をとりまいて貼りつけ，上下それぞれ7個宛直列につないで上下2対のゲージにした。このようにして作つた2対のゲージでブリッジを組む。このブリッジは，管の捩りの歪に対して不平衡をしめし，歪に比例した不平衡電流を生ずるが，管の曲げや，軸方向の縮みの歪に対しては不平衡をしめさない。ブリッジの各辺の抵抗は110 Ωで，5キロサイクル，0.3 Vから10 Vの電圧で使用した。不平衡電流は平衡同調器，増巾器，検波器を通して10 mAの記録電流計，および電磁オッシログラフによつて記録した。電磁オッシログラフの振動子としては，固有振動数1000，2000，4000サイクル毎秒のものを使つた。

雪Bをのせてある廻転台の軸はボールベアリングによつて支えられ，プーレーがとりつけてあつて，減速歯車と革ベルトを介して1馬力のモーターで駆動される。実験装置全体は，低温実験室(温度－25℃)におかれているが，モーター以外の部分は恒温箱の中に入れた。恒温箱内の温度は，精度±0.5℃で，－25℃から－2℃までの任意の温度に調整される。恒温箱内の空気は小型扇風機で攪拌し，温度の均一化をはかつた。恒温箱には底をつけずにおき，実験装置およびモーターは低温室のコンクリートの床に水で凍りつかせた。廻転による振動，雑音を防ぐためである。摩擦面の線速度vは，減速歯車をいくつもつかつて，10^{-5} cm/secから10^{3} cm/secまでかえられるようにした。10^{3} cm/secよりも速い速度を与えると，遠心力のため，特別な保護装置をほどこさないかぎり，雪はこわれてまわりにとびちつてしまう。

輪Aの中心と，廻転台の中心とをよく合せ，又輪の下の面と廻転台の面とが平行になるようにする。それがすんだら，輪Aから上の部分は，恒温箱の天井の孔をとおした紐で，捲取器をまわして，吊り上げておく。こうしてから，電熱器で廻転台をあたため，雪の塊りをのせると，雪の一部はとけて台に凍りつく。つぎに吊りあげてある輪Aの下の面に輪を横切つて，鉄の板でつくつた刃をとりつける。モーターで雪を廻転させながら捲取器をゆつくりまきもどして輪をさげてゆくと，輪につけた刃は雪を少しずつ削りとつてゆく。このようにして注意深く削れば雪の面を輪の面に平行にすることができる。輪Aと雪の面とを平行にしておかないと，輪と雪との接触が不均一になり，廻転とともに輪がおどつて，摩擦抵抗を正確に測ることができなくなる。雪は自然の積雪から切りだしてつかつた。摩擦は雪の性質によつてもかわるが，今回は，すべて密度 0.26～0.49 g/cm³ の範囲のしまり雪についておこなつた実験についてのべる。

鉄の輪Aは外径 20 cm，内径 18 cm で面積 59.7 cm² 厚さ 3 mm である。雪と接触する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は 240 番のものであつた。仕上り面は，みたところ滑らかであるが，30 倍の顕微鏡でみるとかなりの傷がのこつている。面は実験の途中でしばしばアルコールまたはキシロールでふき清浄に保つた。

第2図は電磁オッシログラフで記録された摩擦抵抗の時間的変化の1例である。あとでのべるように，摩擦速度が小さい時には，摩擦抵抗はこれとはいちぢるしくちがつた記録を与えるが，速度が大きい時には第2図のような比較的簡単な記録がえられる。時間は左から右にすすむ。縦軸の目盛は，輪の単位面積当りの摩擦抵抗 f の大きさを表わす。(今後摩擦面全面についての抵抗，荷重を F, W で，単位面積当りのものを f, w であらわすことにする。) 図の説明の中の摩擦速度 v は，摩擦面の平均速度，すなわち，輪Aの幅の中央における線速度であ



第2図　摩擦抵抗のオツシログラムの1例。雪の温度 T_s：−16.5°C，雪の密度 ρ：0.37 g/cm³，摩擦面単位面積当りの荷重 w：0.111 kg-wt/cm²，摩擦面の平均速度 v：3.9 cm/sec。

る。輪は鉄板製の輪で，今後とくにことわらないかぎり鉄の輪の場合である。

第2図のA点でモーターをまわし始めると，摩擦抵抗fは時間の経過とともに増加してBに達し，その後急激に下る。抵抗fがB点に達する迄雪は動かない。(モーターが廻つているのに雪をのせた廻転台はまだ廻転をはじめていないわけである。モーター，減速装置，廻転台の間をつなぐベルトが伸びているのである。) しかし摩擦抵抗fがB点に達すると急にうごきはじめ，同時にfがさがる。したがつて，fが最大静止摩擦抵抗 (今後単に静止摩擦抵抗とよぶ) f_sである。雪がうごきはじめてからしばらくの間，すなわち，B点からC点までの間抵抗は減衰振動的に減少してゆくようにみえる。しかし，これは輪の固有振動をしめすので，摩擦抵抗がこのように変動するわけではない。第2図にあらわれた減衰振動の周期は0.005 secであるが，輪を雪から離して自由に振動させるとおなじ周期の減衰振動を行う。第2図B点で雪は廻転をはじめ，その後は運動摩擦がおこるわけであるが，C点以後のfの値によつて運動摩擦抵抗f_kが示される。

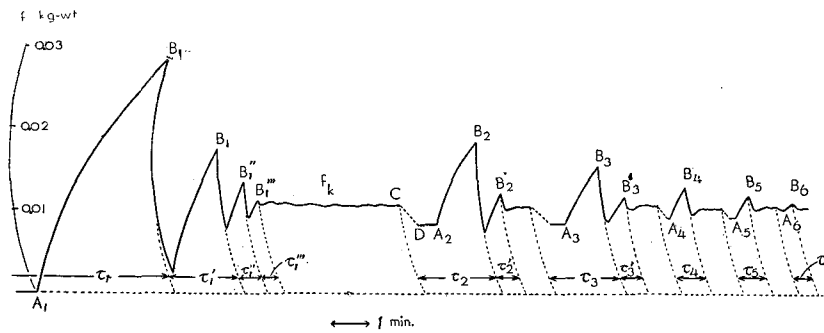
このように静止摩擦抵抗f_sは運動摩擦抵抗f_kにくらべて大きいが，これはよく知られた事実である。しかし，このことのために，f_sを記録できるように測定器の感度を調整すると，f_kの測定のためには感度が不足する結果による。この実験では，運動摩擦抵抗f_kの測定をおもな目的としたので，静止摩擦抵抗f_sについては，簡単な測定を行うにとどめた。

III. 静止摩擦抵抗 f_s

固体間の静止摩擦抵抗f_sは，面の状態と荷重wとのほかに，運動摩擦が始まるまで摩擦物体が接触しつつ互に静止している時間τにも関係することが知られている。雪と鉄との摩擦においても，この静止時間τの影響は著しい。

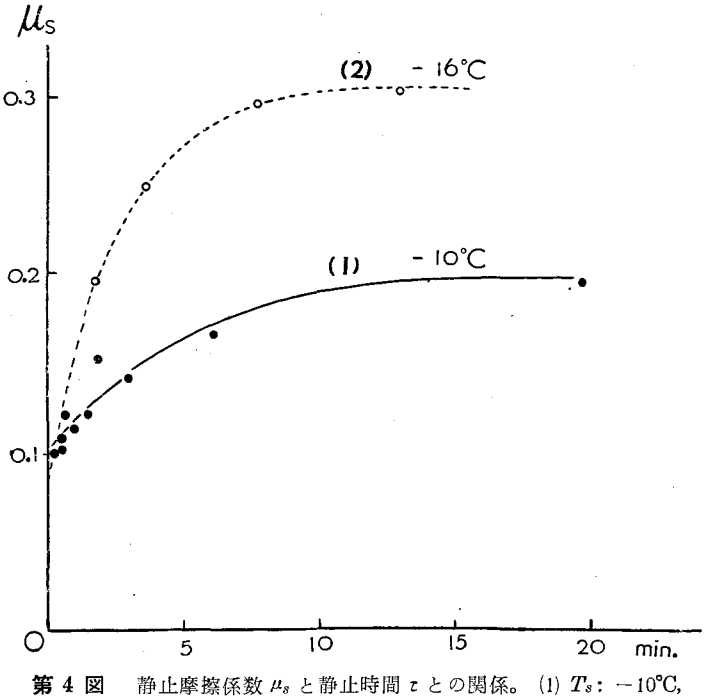
第3図にしめしたのはτを変化させて行つた一連のf_sの測定結果である。ペン書きの記録電流計による記録で抵抗をあらわす縦軸は円弧状にえがかれている。

減速歯車により摩擦面の線速度vを2.5×10^{-4} cm/secという非常におそい速度になるよう



第3図 静止摩擦抵抗f_sと摩擦面の静止時間τとの関係。T_s: −10°C, ρ: 0.28 g/cm², w: 0.111 kg-wt/cm², v: 2.5×10^{-4} cm/sec, τ: 19.8分, τ_1': 1.8分, τ_1'': 0.66分, τ_1''': 0.38分, τ_2: 6.2分, τ_2': 0.63分, τ_3: 3.0分, τ_3': 0.6分, τ_4: 1.5分, τ_5: 0.9分, τ_6: 0.45分。

にしておく。まず鉄の輪を雪の上におろして15分後，第3図 A_1 点のところでモーターをまわした。抵抗 f は次第にまして B_1 点に達したところで，今までとまつていた雪は少し動き，摩擦面に瞬間的な辷りがおこり，同時に抵抗は急激にさがつた。したがつて，B_1 点で静止摩擦抵抗 f_s が示される。しかし抵抗は直ちにまた上昇を始め，B_1' 点に達してからまた急におちる。B_1 点をすぎておこつた瞬間的な辷りの後 B_1' 点になるまでは雪は動かず，辷りはなかつた。B_1' 点からの抵抗の落下の際に再び瞬間的な辷りが生じた。したがつて，B_1' 点がこの時の f_s をあらわす。また，第1回目のばあいの静止時間 τ_1 は，輪を雪にのせてから B_1 点までの時間であり，第2回目のばあいの静止時間 τ_1' は，B_1 から B_1' までの時間である。B_1' をすぎてから B_1''，B_1''' と2つの山があらわれているが，いずれも B_1' とおなじ性質の山で f_s の値をしめしている。B_1''' をすぎた後は辷りが続き，ほぼ一定の運動摩擦抵抗 f_k があらわれるようになつた。C点でモーターをとめたところ，辷りは停止し．抵抗は徐々に降下していつた (C点からD点まで)。雪は鉄の輪が進もうとしていた方向に剪断歪をうけているわけであるが，緩和現象のため剪断応力が衰えていつたためである。モーターをとめて5分の後，A_2 点でモーターをまわすと，抵抗は B_2 に達し，以後まえとおなじような変化がおこる。C から B_2 迄の時間が，静止摩擦抵抗 B_2 に対する静止時間 τ_2 である．その後，モーターをとめておく時間をいろいろかえておな



第4図　静止摩擦係数 μ_s と静止時間 τ との関係。(1) T_s: $-10°C$, ρ: 0.28 g/cm³, w: 0.111 kg-wt/cm², v: 2.5×10^{-4} cm/sec, (2) T_s: $-16°C$, v: 1.0×10^{-3} cm/sec, ρ, w は (1) におなじ。

じことをおこなつた。

このようにして異なる τ (τ_1, τ_1', ……, τ_2, τ_2', ……) に対する静止摩擦抵抗 f_s がもとめられる。τ と，f_s を圧力 w で割つた静止摩擦係数 μ_s との関係を第4図の曲線(1)にあらわした。τ がみじかくなるほど μ_s も小さくなり，ついには運動摩擦係数 μ_k にひとしくなる。このことは直接に第3図についてみてもわかる。第3図ではC点の高さで運動摩擦抵抗 f_k の値がしめされているが，短い静止時間のあとの静止摩擦抵抗の山の高さはCの高さに近い。第4図の曲線(2)は，雪の温度 T_s，摩擦速度 v に曲線(1)のばあいとは異なる値を与えた時のものである。いずれのばあいも，τ が小さいうちは，μ_s は τ とともに大きくなるが，τ がある値をすぎると一定になる。μ_s が一定になる τ は，曲線(1)の場合で20分，曲線(2)の場合で10分程度である。

第4図の曲線は両方ともに $\mu_s=\mu_k+a(1-e^{-\tau/\tau_0})$ の形に表わされる。曲線(1)，(2)についてそれぞれ

$$\mu_s = 0.11+0.12\,(1-e^{-\tau/5.2}),\quad T_s = -10^\circ\mathrm{C}$$

$$\mu_s = 0.09+0.25\,(1-e^{-\tau/2.3}),\quad T_s = -16^\circ\mathrm{C}$$

となる。ただし，τ の単位は分である。

IV. 運動摩擦抵抗の3つの型

第2図，第3図には静止摩擦抵抗 f_s とともに，そのあとにあらわれる運動摩擦抵抗 f_k をしめした。摩擦速度 v の大きい第2図の f_k には短い周期の変動がみられるが，v の非常に小さい第3図では，このような変動はみられない。第3図の記録は記録電流計によるもので，短い周期の変動がたとえあつたとしても記録されない筈だともいえる。しかし，電磁オッシログラフで記録しても，f_k の記録は，長い波長のうねりはあるが滑らかで，第2図のような細かい変動を示さないのである。

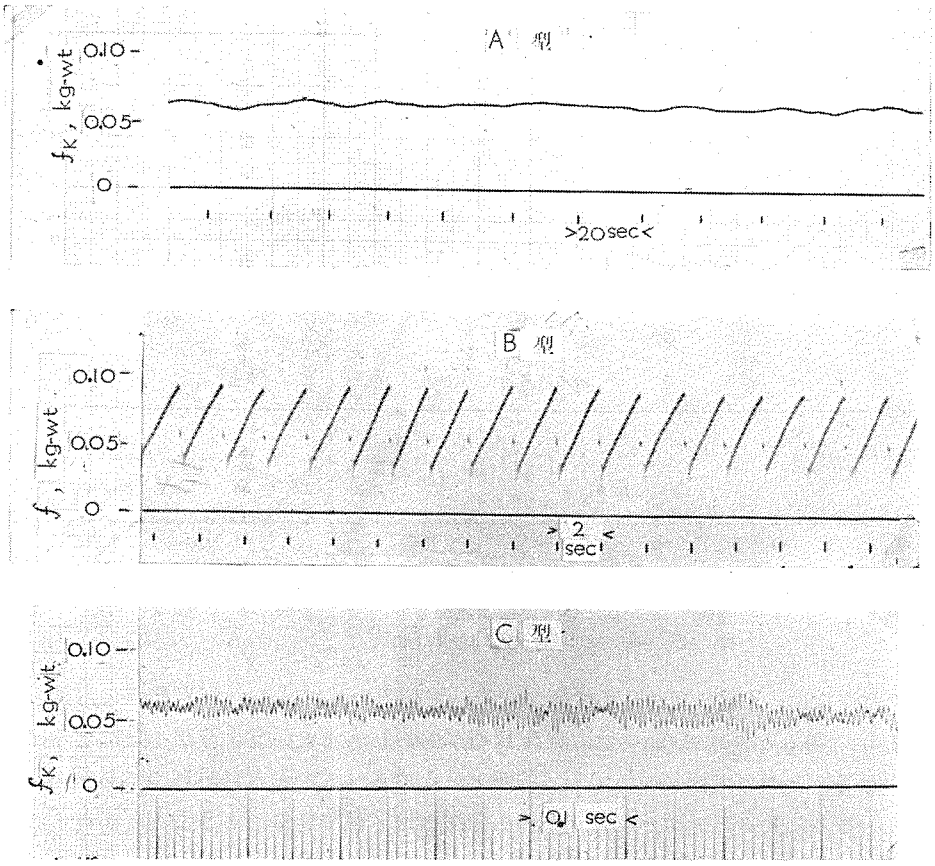
このように，動摩擦抵抗 f_k は摩擦速度 v によつて異なつたあらわれ方をする。そしてここにあげた形式の外にもうひとつ，中程度の v であらわれる鋸歯状波をえがく f_k がある。これら3つの形式の代表例を第5図に示す。いずれも電磁オッシログラフによる記録で時間は左から右にすすむ。いちばん上が第3図にみられる運動摩擦，いちばん下が第2図の運動摩擦と同種である。上から順にA型，B型，C型と名付けると，それぞれについて，次のような特徴をあげることができる。

A 型　f_k は連続でゆるやかに変動する。摩擦速度 v が小さい時にあらわれる。

B 型　f_k は鋸歯状波をえがき，周期的な変化が大きい。中程度の v の時に現われる。−6℃以上の温度では現われない。

C 型　f_k は短い周期で，不規則な小さな変動を続ける。v が大きい時に現われる。

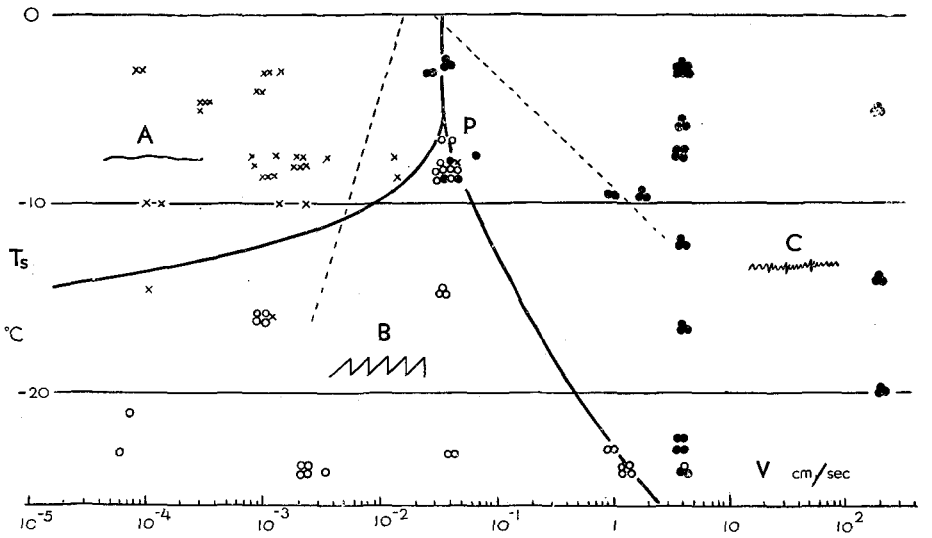
これらの型のいずれが起るかは，v のみならず温度 T_s や圧力 w にもよるであろう。しかし，w を 0.1〜0.3 kg-wt/cm² の範囲で変えた限りでは，摩擦の型に変更はみられなかつた。w の大きな変化に対する影響については将来の研究にまつこととし，w を 0.1〜0.3 kg-wt/cm² に



第 5 図　記録にあらわれた運動摩擦抵抗 f_k の 3 つの型。A 型，T_s：−10°C，ρ：0.28 g/cm³，w：0.111 kg-wt/cm²，v：10^{-4} cm/sec。B 型，T_s：−9°C，ρ：0.28 g/cm³，w：0.26 kg-wt/cm²，v：3.5×10^{-2} cm/sec. C 型，T_s：−12°C，ρ：0.26 g/cm³，w：0.191 kg-wt/cm²，v：3.9×10^{-2} cm/sec。

限定し，3 つの型と v，T_s との関係をしらべてみる。

第 6 図は T_s と $\log v$ との面に 3 つの型を異なる印によつてしめしたものである。十字は A 型，白丸は B 型，黒丸が C 型をあらわす。印は 2 つ以上いくつか固まつて書いてあるが，その 1 つ 1 つはおなじ T_s，v について，圧力 w をかえて行つた結果をしめす。A，B，C の 3 つの型は T–$\log v$ 面の上で，それぞれ太い実線で分けられた一定の領域をしめている。B 型は鋸歯状波というきわだつた特徴をもつているので，他の型と簡単にみわけがつく。しかし，A 型と C 型は，それらの境界附近になると，あまりはつきりした差異をしめさない。A 型と C 型は互に連続的に移行するかも知れないが，ここでは一応図のように，両者のあいだに境界線をひいておく。3 本の境界線の交点 P の温度と速度 T_P，v_P は，それぞれ −6.5°C，2.5×10^{-2} cm/sec である。この温度 −6.5°C 以上では，速度の如何にかかわらず，B 型の抵抗はあらわれなかつ



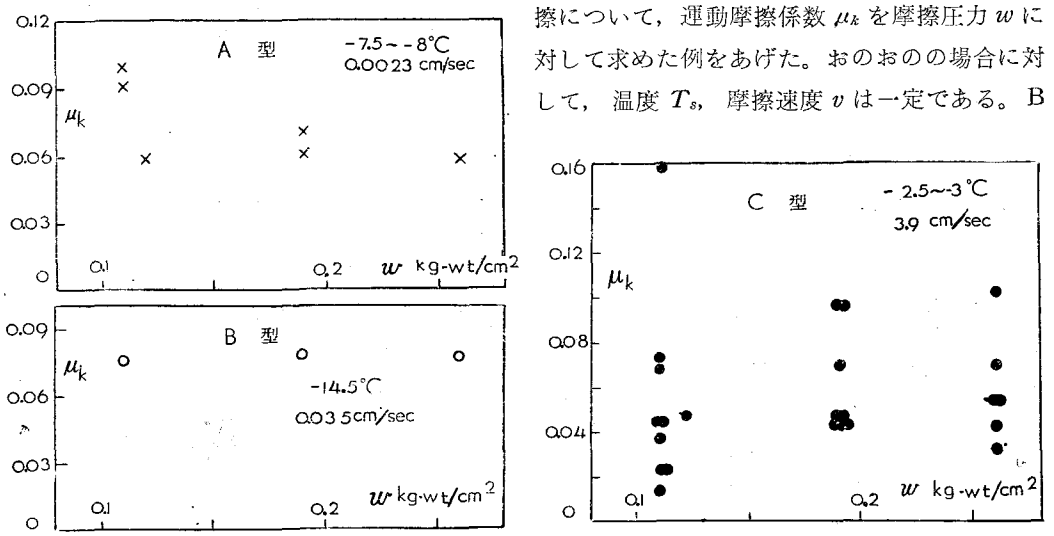
第 6 図 運動摩擦抵抗の3つの型，A型，B型，C型と温度 T_s，速度 v との関係。各型はそれぞれの領域をもつ。太い実線は3つの領域の境界線。鉄の輪。w：0.1～0.3 kg-wt/cm²。

た。P点附近では，3種の型をしめす印が交錯して配置されている。事実P点の温度と速度で実験すると，あるときはA型，他の時はB型があらわれるというようなことになるばかりでなく，おなじひとつの実験についても，時間とともに3つの型が入れかわつてあらわれるようなこともおこる。P点附近にかぎらず2つの領域の境界線でも似たようなことが見られた。たとえば，第3図はA型とB型との境界線附近での実験の結果であるが，A_1 点から B_1'' 点までは振幅が次第に減少してゆくとはいえ，鋸歯状波でB型に属している。しかし，B_1'' 点以後C点まででは，鋸歯状の変化は全く消えてA型に変つている。こういう意味でB型からA型えの移行も不連続的でなく，連続的なものと考えてよいであろう。

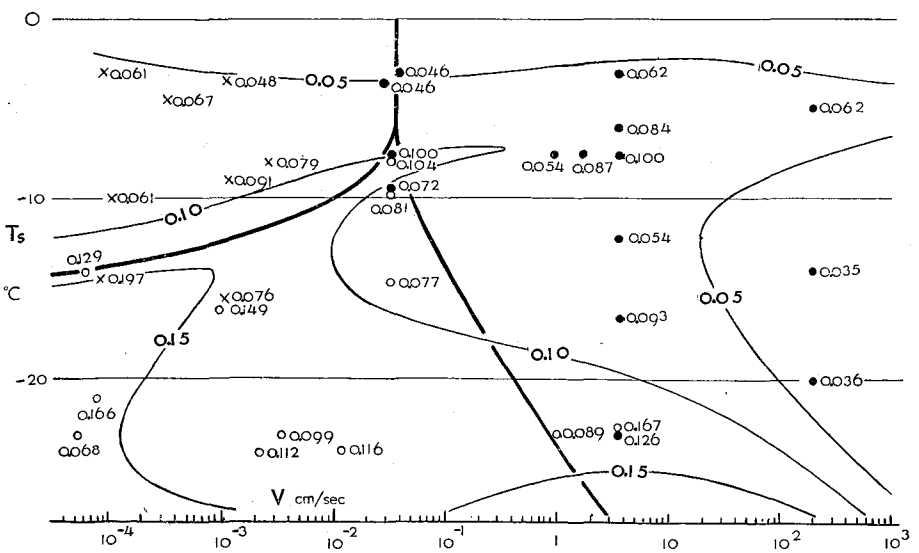
木下[4]はいろいろな値の一定速度で雪を圧縮し，圧縮に対する反抗力を調べ，反抗力に連続的なもの，鋸歯状に変化するもの，不規則な小さい変動を示すものの3つの型のあることを見出した。それぞれの反抗力曲線は，第5図にあげた3種の曲線とほとんどおなじ形である。しかも，圧縮速度と圧縮形式との関係も，摩擦の場合の摩擦速度と摩擦形式との関係とおなじで，圧縮速度の増大とともに，反抗力曲線は連続型，鋸歯型，変動型とかわる。木下はこのような反抗力をしめす圧縮を，それぞれ塑性圧縮，破壊圧縮，第2種破壊圧縮と名付けた。すなわち，摩擦の場合のA型に対応する雪の圧縮変形を塑性変形，B型に対応するものを破壊変形，C型に対応するものを第2種の破壊変形としたわけである。第6図の破線は，これら3つの圧縮型の存在区域を分割する線である。図にみられるように，摩擦と圧縮との場合では，領域の境界は一致してはいないが，互いにかなり類似している。このことは，これら圧縮と摩擦の2つの現象の間に共通な機構が存在することを想像させる。

V. 運動摩擦係数 μ_k

摩擦力 F は荷重 W に比例し，その比の摩擦係数 $\mu=F/W$ は W の大きさに無関係に一定であることが摩擦に関する基本法則のひとつとしてしられている。第7図にA, B, C型の摩擦について，運動摩擦係数 μ_k を摩擦圧力 w に対して求めた例をあげた。おのおのの場合に対して，温度 T_s，摩擦速度 v は一定である。B



第7図　摩擦抵抗の3つの型における μ_k と w との関係。A型，T_s：$-7.5°\sim-8.0°C$，v：2.3×10^{-3} cm/sec. B型，T_s：$-14.5°C$，v：3.5×10^{-2} cm/sec. C型，T_s：$-2.5°\sim-3.0°C$，v：3.9 cm/sec。



第8図　$T_s-\log v$ 面における μ_k の分布。×はA型，○はB型，●はC型の摩擦。印に添えて数字は同一の T_s，v で行われたいくつかの実験が与えた μ_k の平均値。太い実線は各型の領域の境界，細い曲線は等摩擦係数線である。

型の場合の μ_k は鋸の頂と谷との抵抗 f_{max}, f_{min} の平均値から求めてある。3つの型のいずれにおいても，μ_k と w との間に規則的な関係はなく，μ_k は w に無関係のようである。ただ，おなじ温度，摩擦速度でおなじ w について実験をくりかえしても，μ_k の値はおなじにならず分散する。その分散はC型の摩擦においていちばんはなはだしい。しかし，とにかく，μ_k が w には無関係なことがわかつたので，μ_k と摩擦速度 v，温度 T_s との関係をみるため，いろいろな T_s，v の値について求めた μ_k の平均値を $T_s-\log v$ 面に配置してみた。それが第8図である。うねつた細い線は，$\mu_k=0.05$，0.10，0.15 の等摩擦係数線をしめす。一般的傾向として，μ_k は温度が低くなると増し，v が大きくなると減るが，A型摩擦とB型摩擦との領域の境界線及びその延長線に沿つて μ_k は大きい値を示す。

VI. 運動摩擦抵抗の3つの型に関する考察

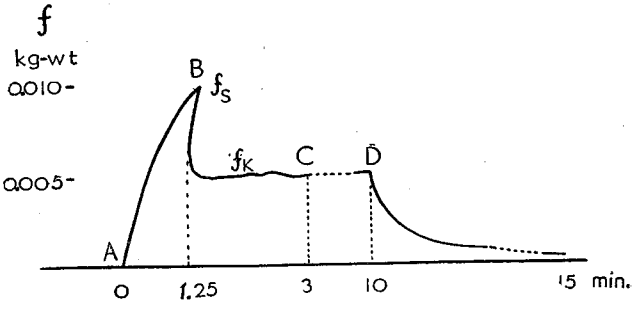
以上のような運動摩擦抵抗の3つの型は，すでに金属間の乾燥摩擦について観察されており，曽田[5]の著書や，Bowden と Tabor[6]の著書に詳しい記述がある。しかし，雪や氷と他の物体との摩擦についての報告は未だないようである。Bowden は雪の摩擦についても書いているが，3種の型にはふれておらず，摩擦抵抗が小さいのは，摩擦熱によつて雪や氷がとけて，その水が潤滑作用を行うことに止めている。上にしめしたように，雪と鉄との摩擦にも異なる型が存在するということは，その摩擦が金属間の摩擦と共通なものを多くもつていることを思わせる。なお，摩擦現象には物質の融解が大きな影響をもつことが確かめられているが，金属間の摩擦を研究するに当つては，融解点が高いので，その附近での実験にはいろいろな困難があろうと想像される。雪の摩擦のばあいは，これに反して，融解点から遠く距つた温度での実験の方がむしろ困難である。この点で，雪のばあいは融解と摩擦との関係をしらべるのに適している。

金属間の摩擦抵抗の時間的変動の研究は，見かけの接触面積を非常に小さくして行われるようである。たとえば，一方の金属は板にして移動させ，他方の金属を細い棒の形に作つて，その先端で板に接触させる。こうすれば，真実接触面積は狭いばかりか，その数もせいぜい1つか2つであろう。しかし，ここに行つた雪の摩擦では，鉄の輪と雪との見かけの接触面積は 59.7 cm² というように非常に広い。雪は塑性変形をおこしやすいので，真実接触面の数は多く見かけの接触面積の全体にわたつて分布しているであろう。にも拘らず，B型の摩擦抵抗では，変動が激しいにもかかわらず，非常に規則的な変化が長時間にわたつて続けられる。これは，摩擦現象が非常に規則的なものであり，多くの真実接触面でおなじように起つているものと解釈してよいであろう。

(1) A型の運動摩擦

第6図でみられるように，この型は摩擦速度 v が小さく，温度が比較的高い時に現われる。前にあげた第3図は，A型の摩擦曲線であるが，A型とB型との境界線附近のものであつた。A型摩擦領域の中心部で実験の始めから終りまでの摩擦曲線を書くと第9図のようになる。

A点でモーターを始動すると，摩擦抵抗fは上昇して1.25分の後B点に達してから急に落ち，その後は一定の値f_kをもち続ける。このf_kがA型運動摩擦抵抗である。始動後10分D点でモーターをとめると，fはよく知られている応力緩和曲線とおなじ形の曲線をえがきながら，減少してゆく。これは，摩擦面下，ある厚さの雪の層に摩擦によつておこされた剪断応力が次第に緩和されることを示すものに他ならない。



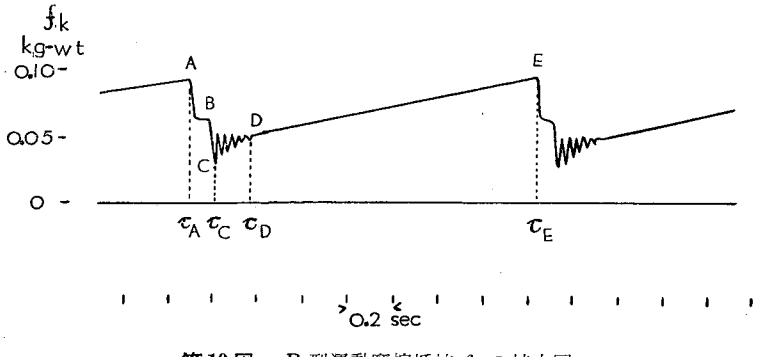
第9図　A型の摩擦曲線
T_s: −4.5°C,　v: 3.3×10^{-4} cm/sec,　記録電流計による。

前に，A型摩擦は雪の塑性圧縮に対応することをのべた。しかし，次の点で両者のあいだには本質的な差がある。破壊圧縮から出発して圧縮速度を減してゆくと，圧縮抵抗曲線の鋸歯は幅がひろくなるとともに平らになり，ついに塑性圧縮に変るのである。第9図を借りていえば，AからBまでの曲線がBで途切れず，そのまま右上方に次第に上昇速度を落しながら進んでゆくのが塑性圧縮であつた。しかし，A型摩擦では，そのようなことにならず，現実に第9図のようになるわけである。これについては，次節で，なお，考察をすすめる。

第6図にみられる通り，A型摩擦は温度の比較的高い範囲に限られている。摩擦熱によつて生じた微量の融解水の潤滑作用のため，滑かな変化の少ない抵抗曲線を与えるのではないかと思われる。

(2)　B型の運動摩擦

第10図は時間軸を拡大してとつたB型のオッシログラムである。A点からE点までの鋸歯的変化が長時間にわたつてくりかえされる。このうち，A点からC点までの間に辷りがおこり，C点からE点までの間は辷りはなく，雪は静止している。(第II節でものべたように，モ



第10図　B型運動摩擦抵抗f_kの拡大図
T_s: −9°C,　ρ: 0.28 g/cm³,　w: 0.264 kg-wt/cm²,　v: 3.5×10^{-2} cm/sec。

ーターと雪をのせた廻転台とを結んでいるベルトがのびて，モーターは廻転しているにもかかわらず，廻転台はこの期間まわらない。）このようにB型のばあい，雪は間歇的に辷るのであつて，静止摩擦抵抗のくりかえしとみることができる。しかし，A点からC点までの辷りの途中には，Bと印した階段がみられる。辷りの途中で一時的休止があるわけである。第5図の中段の図においては，休止が黒い点になつてしめされている。この辷りの休止はたいていの場合現われるが，あらわれないこともある。C点とD点との間の減衰振動は，第2図のBC間のものとおなじく，鉄の輪の減衰振動をあらわしている。ただし，第2図の場合，減衰の仕方は対数的で，速度に比例する抵抗による減衰振動であるが，第10図の場合の減衰は直線的で，減衰の原因が速度に依存しない一定値の摩擦抵抗であることをしめしている[7]。

このB型に示されるような鋸歯状の摩擦抵抗は，Bowdenが異種金属間の摩擦について発見した。水平に動く金属の板に，弾性的に支えられた金属の棒をおしつけて，金属棒の小さな運動を拡大記録することによつて発見したのである。筆者の行つている雪の摩擦の測定方法も結局は，おなじ方法によつているわけである。このBowdenの発見に対して，このような現象がみられるのは観測の方法のためであつて，実際の摩擦においてもこの現象がおこるか否か疑問であるとの抗議がある[5]。板におしつけられた棒が弾性的にうごきうるという点がこの抗議の根拠となつている。したがつて，この抗議は筆者のばあいにもあてはまるわけであるが，いまは，それには立ち入らない。

Bowdenは接触点が互に静止している時は，そこで両金属が凝着しており，この凝着部が破壊されて辷りがおこることを明らかにして，この現象をstick-slipとよんだ。凝着は摩擦熱による接触点の融解凝固，あるいわ低温癒着 (cold welding) によるものと考えられる。B型の雪の摩擦もこのstick-slipによつておこるわけである。雪の摩擦の場合，第6図にみられるように，B型の領域はvのあまり大きくない範囲で，温度の低い方に末ひろがりにひろがつている。温度の比較的高い場合には融解凝固による凝着もおこりうるであろうが，このように低温でB型が優勢であることは，低温癒着が凝着の主な原因であることを示すもののようである。融解については第VIII節で詳しく考察する。

前にものべたようにB型は，木下の雪の柱の圧縮実験における破壊圧縮のばあいに対応する。破壊圧縮では，雪の柱はその端面で間歇的に破壊しつつその長さを減じてゆく。少なくとも間歇的に破壊がおこるという点で，破壊圧縮とB型摩擦とは互に似ているわけである。

(3) C型の運動摩擦

この型の抵抗は摩擦速度vが大きいときに現われ，第5図下段のオッシログラムに示されるように，抵抗の値に大きな変動はないが，短周期の細かい変動がある。しかし，このオッシログラムの細かい波それ自身が忠実に抵抗値の変化をあらわしているとはいえない。雪と摩擦する鉄の輪の固有振動周期が，オッシログラムに現われた波の周期と同程度のものだからである。しかし，実際の抵抗の値に非常に細かい変動のあることは確かである。

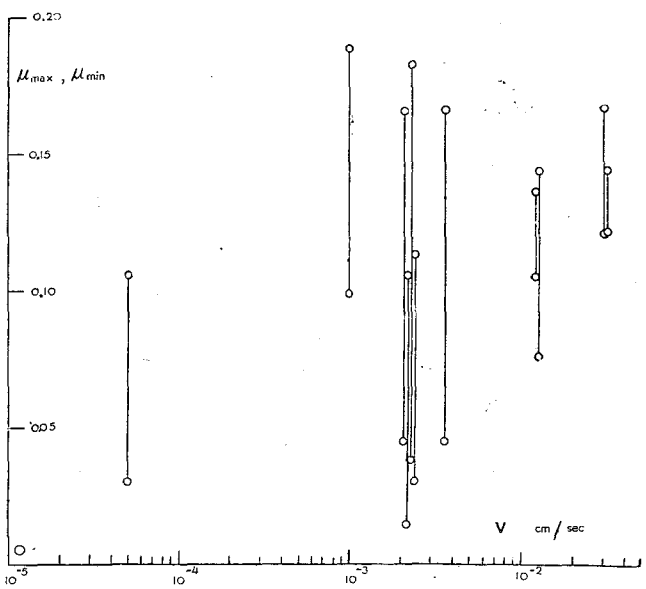
VII. 摩擦形式の間の移行

前々節で，A, B, C 3つの摩擦形式のあいだの移行はある意味で連続的であるということを述べたが，それについてもう少し考察を進める。

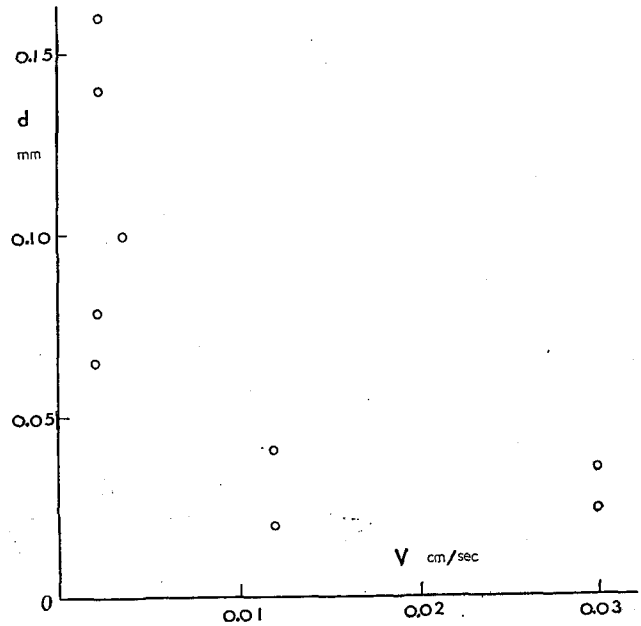
第11図は −23°～−24°C での B 型摩擦の摩擦係数 μ_{max}, μ_{min} と摩擦速度 v との関係である。B 型の摩擦抵抗 f は鋸歯状の曲線を与え，f は極大値 f_{max} と極小値 f_{min} との間を上下する。μ_{max}, μ_{min} は f_{max}, f_{min} を圧力 w で割つたもので第11図の縦の直線で結ばれた円印の上のものが μ_{max}, 下のものが μ_{min} である。この図では v は右の方に向つて増大しているが，μ_{max} と μ_{min} との間隔は，右の方に進むにつれて縮まり，μ_{max}, μ_{min} の平均位置は高くなる。このことは，v の増大とともに，摩擦抵抗曲線の平均位置の高さにくらべて鋸歯の高さが減ることをあらわす。それにともなつて，実際に，鋸歯の幅もせまくなり，結局，細かい鋸歯のつらなつた抵抗曲線になるわけであるが，これは正に C 型の抵抗曲線である。したがつて，C 型摩擦も，本質的には B 型，すなわち stick-slip 型の摩擦であるということができる。

B 型の抵抗曲線の鋸歯の幅，すなわち鋸歯の時間を τ とすれば，τ と v との積 $d=\tau v$ は，各鋸歯の左端での摩擦抵抗の急激な減少の際におこる辷りの長さ，すなわち辷る距離にひとしい。第12図は −23°～−24°C の B 型摩擦について，d を v に対してあらわしたものである。d は v の減少とともに，急激に増大している。

先に，第9図に示したように，A 型摩擦ではモーターの始動とともに摩擦抵抗は増大して



第11図　B 型摩擦の摩擦係数 μ_{max}, μ_{min} と v との関係
T_s:　−23°～−24°C



第12図 B型摩擦における $d\,(=v\tau)$ と v との関係。τ は1つの鋸歯における摩擦面の静止時間，d は1つの鋸歯毎におこる摩擦面の辷りの距離(mm). T_s: $-23°$ ～-24℃。

頂点に達する。そして瞬間的な辷りがおこりひとつの鋸歯を描くが，そのあと水平な連続曲線が続く。しかも瞬間的辷りをあらわす鋸歯の右端の落下から水平線への移行は滑らかである。水平な連続曲線はそこに“辷り”が長期間おこつていることを予想させるが，水平連続曲線が鋸歯の右端の瞬間辷りにつながつていることは，さらに，それがおなじく“辷り”であるという予想を助ける。上にのべたように，v の減少とともに d は急激に増大する。極端な v の減少によつて d が極端に増大しなければならないとき，それは，うえのような長期の辷りによつて実現されると考えることができるであろう。そして，この長期の辷りが，A型と名付けた摩擦である。

B型摩擦では瞬間辷りが長期の辷りに変ろうとする時に凝着が起つたと考えることができる。それで，長期の辷りと瞬間辷りとが同性質のものであるならば，瞬間辷りの途中においても凝着がおこつてもよい筈である。前節でB型摩擦を説明した時，瞬間辷りの途中に休止があることをのべたが(第10図のB点の階段)，これは，この凝着が軽度に現われたものと見ることができるであろう。

なお，前述の木下の圧縮実験でも，各圧縮形式の移行は，ここにのべたように連続的である。殊に破壊圧縮から第2種破壊圧縮への移行形式は，B型摩擦からC型摩擦への移行形式と全くおなじである。

雪の摩擦には，雪の表面だけでなく，表面の下数 mm の厚さの層も関与する。鉄の輪にこすられてできた路を横断して雪を切り，切口にインクをとかした水をかけると，第13図(1)(第 VIII 節に挿入) の写真のように，摩擦面の下数 mm の厚さがインクで濃く染まる。濃く染まるのは，雪の密度が高いためで，このことは摩擦によつて雪が破壊圧縮されたことをしめしている[1]。鉄の輪をただ雪の上にのせただけで，雪を廻転しなければ，この圧縮層は現われない。したがつて，これは摩擦力によつて雪がひきちぎられ，表面層が剪断歪をうけて生じたものに相違ない。このように，摩擦面の下数 mm の雪が歪をうけるということからみても，雪の圧縮と摩擦との間の類似性は充分に予想される。

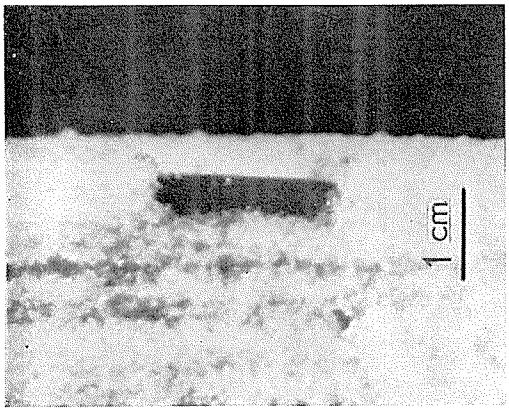
上に説明したように，各種の摩擦形式の間の移行が連続的であることは，それらの形式を明確に分割することの意味を失わしめる。しかし，ある幅をもつた移行が行われる移行帯はたしかに識別しうるのであつて，その中央を通る線によつて移行帯を代表させてよいであろう。第6図の太い実線であらわした分割線は，このような線をしめしているわけである。

VIII. 摩擦面における雪の融解

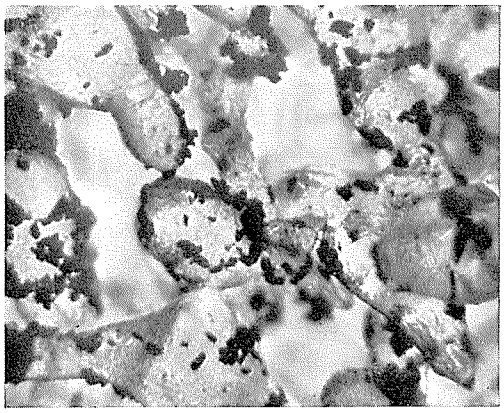
Bowden は氷と他物体との摩擦のばあい，摩擦熱で氷の一部がとかされることをたしかめるため，つぎの実験を行つた。エボナイトで小さい模型のスキーを作り，その滑走面に 2 mm 距つた 2 つの電極をとりつけ，電極の間の電気抵抗を測定した。氷としては KCl を含む氷をつかつた。氷がとければ KCl の溶液ができ，電極間の電気抵抗が下るので，それによつて融解を知ることができるであろう。−20°C という低い温度では，はつきりした電極間の抵抗の低下は認められなかつたが 0°C 近くでは抵抗が間歇的に低下することがみとめられた。Bowden は電極間に厚さ 10^{-2} cm 又はそれ以下の水の膜があらわれたとのべている。しかし，KCl を含む氷には，温度が共融点 −11.1°C 以上である限り，かならず液体の塩溶液が存在する。そして，この塩溶液の量は，0°C に近づく程増加する。したがつて，たとえ摩擦熱による氷の融解がなくても，氷の温度が 0°C に近づけば電気抵抗の低下がおこる筈である。(Bowden はこのことにはふれていない。)

筆者は雪の摩擦面にメチレン青の粉をまいて雪の融解がおこるか否かを調べることを試みた。摩擦形式としては，摩擦速度 v が大きく摩擦熱の発生量の多い C 型を選んだ。メチレン青は黒色に近い濃い青色をして粉末で，氷にはほとんど作用しないが，水にふれると解けて水を青色に染める。その後水が凍つても，そのまま凍結して青色の固溶体となる。したがつて，もし摩擦面で雪の一部がとけて凍れば氷が青く着色されるので，それによつて融解がおこつたか否かを見ることができるであろう。メチレン青は，雪の研究においてしばしば使われている。たとえば，雪どけの際，とけた水をこれで染めて水の流れを追跡するのに使われたりする。また，クラゲリスキー[8]はメチレン青の粉を混ぜこんだ乾いた雪を圧縮し，雪が染まらなかつたことから，乾いた雪の圧縮に際しては復氷現象はおこらないという結論をだしている。

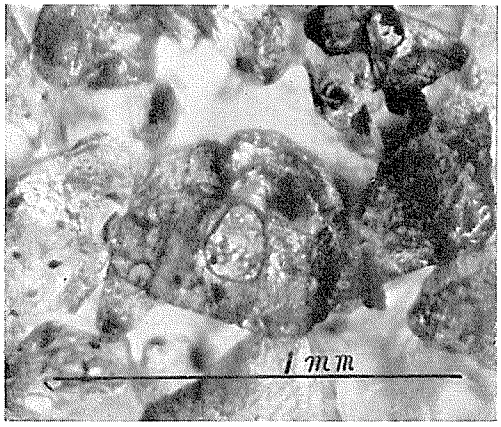
ところで，メチレン青の粉を 0°C の乾いた氷に接触させると，粉は氷をとかして青く染め



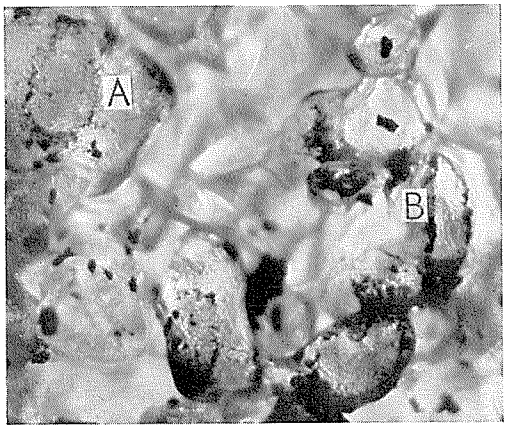
第13図 (1) 摩擦輪の跡の横断面．インクで着色．T_s：−3°C，ρ：0.21 g/cm³，w：0.002 kg-wt/cm²，v：40 cm/sec，摩擦面の移動距離 l：85 cm。



第13図 (2) 雪にメチレン青の粉をまき，−2°C，一昼夜，輪の下に放置したもの。w：0.19 kg-wt/cm²。



第13図 (3) 鉄の輪 T_s：−5°C，ρ：0.35 g/cm³，w：0.19 kg-wt/cm²，v：4.7 cm/sec，l：120 cm。(写真(2)，(4)とも，倍率は(3)におなじ)。



第13図 (4) 鉄の輪。T_s：−10°C，ρ：0.35 g/cm³ w：0.19 kg-wt/cm²，v：4.7 cm/sec，l：60 cm。

る。しかし，氷の温度が少なくとも −2°C 以下ならば，ほとんど氷をとかすことはない。第13図(2)の写真はメチレン青の粉を雪の上にふりかけ鉄の輪をのせ，雪を廻転させずに1昼夜−2°C で放置したあとの顕微鏡写真である。しさいにしらべると，粉と雪と接触しているところで，少し色がにじんでいることもあるが，それはごく一部の雪についてである。もちろん温度がもつと低ければ，にじみは全くみられない。したがつて，このような雪の面を摩擦したあと，顕微鏡でしらべ，メチレン青の粉にとけた証拠がみとめられれば，雪の温度は少なくとも−2°C 以上にはあがつたということができる

第13図(3)の写真は −5℃, $v=4.7$ cm/sec で鉄と雪との間にC型の摩擦をおこさせたあとを示す。摩擦距離 l は 120 cm であつた。写真の真中の雪粒の表面に黒い卵形の輪があるが，これは実際には青い輪である。輪の中は平らでうすく青色に染つていた。この雪粒の左の端近くには，形の小さな同じような輪が更に2つみられる。これらの輪の外にあつて，おなじ雪粒に附着しているメチレン青の粉も大分形が崩れている。しかし，この雪粒のまわりにあつて，位置が低く，摩擦面から離れていた雪粒についたメチレン青の粉はほとんど元の形を保つている。写真中央の雪粒だけにこのような青い輪があらわれたり，それに附着しているメチレン青の粉の形が崩れたりしていることは，この輪のところで，鉄との接触がおこり，摩擦熱によつてこの雪粒の温度が，−2℃以上になつたことを示している。おそらく，鉄との真実接触面で氷はとけ，とけた水はたまたま近くにあつたメチレン青の粒をとかして接触面の周囲に押出され，そこで凍結し青い輪を作つたのであろう。

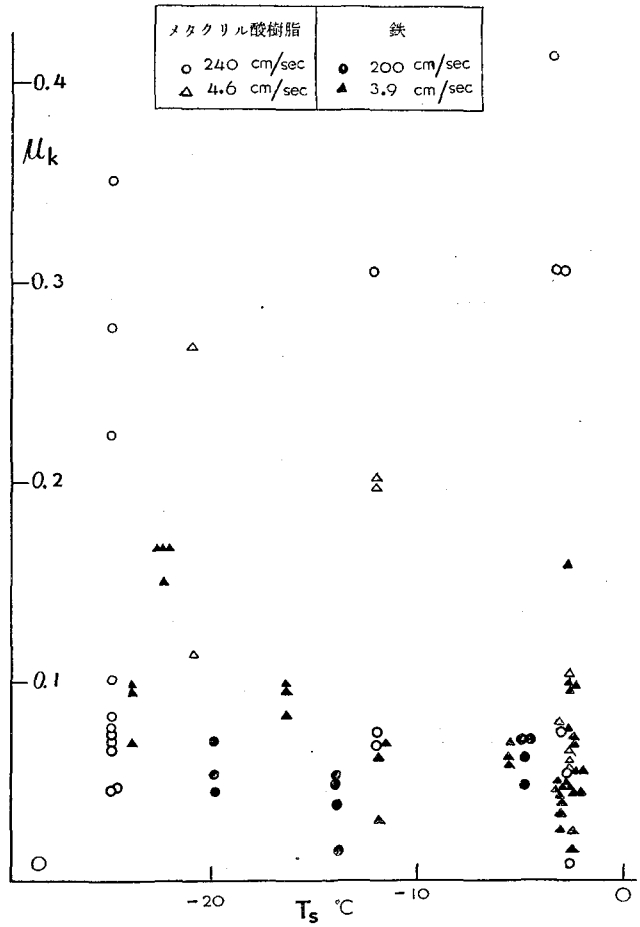
第13図(4)の写真は −10℃で同様の実験を行つたときの結果である。写真(3)のばあいにくらべると程度は低いが，A，Bと印した雪粒に，写真(3)の中央の雪粒にみられたとおなじことが起つている。−20℃附近で行つた実験では，青い輪はみられなかつた。しかし，メチレン青の粉が少しにじんでいる雪粒が所々に散在していた。雪粒の温度は，20℃あるいはそれ以上も上昇しうるわけである。

以上のことから，前節にのべたように，温度が比較的高い場合には融解凝固による凝着がおこり，低温になるにつれ，融解凝固の現象は後退して低温癒着が主なものになると考えてよいであろう。

今まではすべて摩擦体として鉄の輪を使つてきたが，メタクリル酸樹脂の輪（外径 24.7 cm，内径 20.0 cm，厚さ 1 cm，接触面積 165 cm²）での実験も行つた。摩擦速度 v の速い場合だけしか実験していないので，鉄の場合のような3種の型があるか否か確かでないが，あるとしたら，C型摩擦についての実験を行つたことになる。鉄の輪のばあいにくらべ，メチレン青による雪粒の染色のされ方が強かつた。メタクリル酸樹脂の熱伝導率は鉄の 300 分の 1 ぐらいであるから，雪粒の温度は上昇しやすいわけである。したがつて，Bowden のいうように，雪の摩擦熱によつて融けてできた水に強く影響されるものならば，鉄のばあいにくらべて，メタクリル酸樹脂の場合の運動摩擦係数 μ_k は小さくならなければならない。ところが実験の結果では，逆にメタクリル酸樹脂の方が鉄よりも大きな μ_k を与えるのである。

第14図には，摩擦速度 v がC型摩擦の範囲内で大きいばあいと小さいばあいとについて，鉄，メタクリル酸樹脂との間の動摩擦係数 μ_k を温度 T_s に対してしめした。白い印がメタクリル酸樹脂，黒い印が鉄の場合の μ_k であるが，黒い印はわりあいに分散度が小さいのに対して白い印は非常に散らばつている。しかし全体としてみると白い印の位置は高く，メタクリル酸樹脂の方が，鉄よりも μ_k が大きいという結果になる。

以上のことから考えて，雪と他物体との摩擦においては，摩擦熱によつてとけた水が潤滑作用をするという考えに対しては疑問があるように思われる。メチレン青の粉を用いた実験に



第14図 メタクリル酸樹脂及び鉄の運動摩擦係数 μ_k と温度との関係。v はいずれも C 型の運動摩擦の範囲。

よつて，水ができることは確かめられたが，その水自身はあまり大きな働きはしていないのではあるまいか。雪を作つている氷それ自身と他物体との乾燥摩擦が主要な現象と考えられるのであつて，次のことはそれを裏付ける一つの事実と考えてよいであろう。メタクリル酸樹脂での実験では，時々異常に大きい μ_k があらわれることがあつた。第14図には，このばあいの μ_k は除外していれていない。また，ときには，−20°C の低温にもかかわらず，雪とメタクリル酸樹脂の輪がくつついてしまつて，雪を廻転させられないこともあつた。勿論温かい輪をのせたわけでなく，充分に −20°C まで冷した輪を雪にのせておいただけで凍りついてしまつたのである。このように輪に凍りついた雪の附着力は非常に強く，雪を輪からとり去るためには，煖めて雪をとかす以外に方法がなかつた。鉄の輪は，雪の上に1日や2日置いても雪が凍りつくことはなかつた。このことは，鉄とのばあいにくらべて，メタクリル酸樹脂と氷との附着力

が遙かに大きいことを示している。C型の摩擦を頻繁におこる stick-slip であると考えれば，附着力の大きいことは当然 μ_k の増大をもたらすわけである。

おわりに，この研究に当つて低温科学研究所の吉田順五教授に多くの御教示をいただき，藤化成株式会社の谷田部善雄氏にメタクリル酸樹脂について御配慮をうけた。尚，この実験に使用した第1図の装置は，低温科学研究所の大方由松，小笠原英治両君の製作になるものである。振動のない一様な廻転を与えるため，また，輪が廻転台に平行を保つて滑らかに上下する様特に注意が払われている。ここに記して上の方々に感謝の意をあらわす。また，この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によつておこなつたものである。

文　　献

1) 藤岡敏夫 1957 スキーの研究 (3). 低温科学，物理篇，**16**，31.
2) 藤岡敏夫・疋田裕 1954 雪橇の抵抗 II. 低温科学，物理篇，**13**，37.
3) 応力測定技術研究会編 1955 応力測定. 158.
4) 木下誠一 1958 積雪に於ける変形速度と変形形式との関係 II. 低温科学，物理篇，**17**，11.
5) 曽田範宗 1954 摩擦と潤滑. 岩波全書，**192**，69.
6) Bowden, F. P. and D. Tabor 1954 The Friction and lubrication of solids. 2nd ed. 65, 105.
7) 萩原尊礼 1945 振動測定. 29.
8) Kragel'skiy, I. V. 1942. Fiziko-mekhanicheskie svoyctva snegovogo pokrova. Sb. materialov po stroitel'stvu i ekspluatsii zimnikh aerodromov, vyp. 1.
(Kuzimin, P. P. 1957 Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova, 19 の招介による)。

Résumé

In order to study the friction between iron and snow an annular plate of iron was put on a rotating disc of snow.. (See the photograph in Fig. 1 of the text.) The annular plate was held at its center by a tube of phosphorbronze on the surface of which were cemented strain gauges. The force of the friction between the annular plate and the snow gave a twist to the tube of phosphorbronze and the strain gauges on it converted that twist into an electric current. The electric current was registered by a recording galvanometer or by an electromagnetic oscillograph. The experiments were made at several temperatures lying between −2 and −23°C. The frictional speed v, that is, the linear speed of snow against the iron plate, was altered in a wide range from 10^{-5} to 10^{3} cm/sec.

It was found that there are three types of kinetic friction. The author names them A, B and C. The three curves of frictional force shown in Fig. 5 belong to types A, B, C respectively from above to below. Type A is continuous, type B is saw-toothed and type C is characterised by small irregular fluctuations. Which of the types is realized depends upon the frictional speed v and the temperature T. They are indicated on $T-\log v$ plane of Fig. 6 by different marks: type A by crosses, type B by light circles

and type C by solid circles. Type A occupies the region of high temperature and low speed, type C that of high temperature and high speed, while a wide region is covered by type B at low temperatures. The values of the coefficient μ_k of kinetic friction are plotted on T—$\log v$ plane of Fig. 8. Their general dependency on T and v will be seen from the thin curves which are drawn so as to run through the points of prescribed values of μ_k.

Kinosita (reference (4)) compressed snow at constant speeds of different magnitude and registered the resistance R exhibited by the snow against the compression. He found among the curves of R three types quite similar to those shown in Fig. 5. The contraction of snow corresponding to types A, B, C of kinetic friction were named respectively plastic contraction, destructive contraction and destructive contraction of the second kind. Which type came into existence depended also in this case upon temperature T and the speed v of compression; in Fig. 6 the broken lines are drawn so as to divide the T—$\log v$ plane into the regions of those three types of contraction.

The saw-toothed character seen here on the frictional curve of type B was discovered by Bowden first in the friction occurring between two metals of different kinds. Within the interval of the rising oblique portion of the saw-tooth the snow remains stuck to the iron while a slip occurs between them at the instant of the sudden drop at the end of the saw-tooth. Bowden called this phenomenon "stick-slip." With the increase in frictional speed v, the saw-teeth diminish both in height and width and finally change into the small fluctuations of the friction of type C.

The product of v into τ—the time interval of one saw-tooth—gives the length $d(=v\tau)$ of the slip. The length d rises rapidly with decreasing v as shown in Fig. 12. If v is so decreased as to give the friction of type A, the curve of frictional force starts in such a manner as shown in Fig. 9. On setting the snow disc into rotation at point A, the curve rises rapidly to reach point B and, after having dropped a short distance, bends to become horizontal. From point A to point B the snow sticks to the iron and then slips causing the drop from point B to point C. In this way a saw-tooth is made. It is not followed by another saw-tooth—unlike in the case of B-type—but is followed by the horizontal line which indicates that a long slide occurs between the snow and the iron. The author believes that there is no essential difference between slip and slide. Then it may be supposed that the slip characteristic to type B is prolonged by being followed by the slide, if d, the length of the slip, should have to be indefinitely lengthened due to the unlimited decrease in the frictional speed v. In a formal sense at least, the shift from type B to type A caused by decreasing v can be explained in such a way.

In order to examine if the snow can be melted on its rubbed surface by the heat of friction, on the snow powder of methylene-blue was scattered beforehand. When put in contact with methylene-blue, water becomes blue by dissolving it while ice has no effect upon it. Therefore, if any trace of melt is found on the powder after the snow surface on which it was scattered has been rubbed, it can be concluded that the snow surface has been melted. The microphotograph (3) of Fig. 13 shows a small portion of

the snow surface rubbed by the iron plate at −5°C. On the ice granule located at the center one will see an oval ring which is in actuality is blue in color. The grains of powder stuck to that granule have got out of shape. The likes can also be seen in photograph (4) which shows the snow surface rubbed at −10°C. These indicate with no doubt that the snow has melted. If an annular plate of methacrylic acid resin is used in place of the iron one the ice granules of snow become tinted blue all over their surfaces showing that snow has been melted more vigorously. Bowden is of the opinion that the melt water is very effective in lubricating the snow surface. Then the friction should have been smaller on methacrylic acid resin than on iron. But the reverse was found actually as shown in Fig. 14. In this figure the light and solid marks indicate the coefficient μ_k of kinetic friction respectively for the cases of methacrylic acid resin and iron; the light marks are positioned on the average higher than the solid ones.