

雪と氷の動摩擦

黒岩 大助*

スキーやスケートがすべるのは、氷が摩擦融解でとけ、水になり、潤滑作用をする（自己潤滑）として説明されてきた。この考えは、滑走速度が大きいときは正しいが、速度が小さく氷がとけないときは成り立たない。自己潤滑が起こらないときは、氷結晶の底面すべりと氷の表面に存在する擬似液層とが氷の動摩擦係数の値を低くする役割を演じていると考えられる。

Kinetic Friction of Snow and Ice

Daisuke KUROIWA*

It has been believed that ski and skate can slide as the result of the self-lubrication due to frictional melting of ice. This argument is quite reasonable when a sliding velocity of the ski or skate is large enough to melt ice. However, ice has a low value of the coefficient of kinetic friction even when the self-lubrication of ice does not occur between a slider and ice. The low value of the coefficient of the kinetic friction of ice measured at a low sliding velocity where no frictional melting occurs can be explained by the easy basal glide which occurs under the shear stress application and by the existence of quasi-liquid layers on ice's surface.

1. はじめに

スキーやスケートはもちろん、近年、日本でも盛んになりつつあるカーリングなどは、雪や氷がよく滑ることを利用して楽しむ冬のスポーツである。カーリングは重い石塊を氷上で滑らせ、所定の場所に入れる競技であるが、石の滑りをよくするため、前進する石の直前を選手が箒ではいてゴミを払っていく姿は大変ユーモラスである。雪や氷が非常に滑りやすいという性質は、雪国の冬のレジャーに大いに利用されているが、その反面、車のスリップ事故を増大させるので厄介である。

摩擦の研究家の話では、通常の固体摩擦ではピカピカに磨かれた滑面であっても、動摩擦係数 μ_k の値は0.6~0.3の程度だという。これに比べると、スキー場の雪面やスケートリンクの氷面は、でこぼこしているのに0.06~0.003という小さい値である。雪や氷の μ_k はなぜこんなに異常に小さいのだろうか？本稿では、雪や氷の固有の物性と μ_k との関係に最近の研究のスポットを当ててみることにしよう。

2. 摩擦の要因

2つの物体が相接して相対運動をしているとき、接触面では運動を阻止しようとする抵抗が働く。これが摩擦である。Fig. 1の(1)のように、滑面Bの上で物体Aを滑らせるとき、Aを引きずるに要する力Fは、Aの重さWに比例し接触面積の大小には無関係というのが摩擦の経験則である。比例係数を μ とすれば、 $F=\mu W$ である。Fを増していきAが動き出す瞬間の力 F_s とWとの関係から静止摩擦係数 μ_s が、またAが動きだしてからの力 F_k とWとの関係から動摩擦係数 μ_k が定義される。実験によると、 $\mu_k < \mu_s$ である。実用的には μ_s より μ_k の方が重要である。 μ_s も μ_k もともに接触面の粗度、摩擦している両物体の物性によって大きく左右される。

さて、摩擦の教科書によると、古代の研究者は、物体を滑らせるに要する力が物体の重さだけに比例し、接触面積の大小によらないという実験事実の解釈に苦しんだそうである。ちょっと考えると、接触面積が広いほど引きずるに要する力も大きくなりそうだからである。この困難は、今日では「真実接触面積」の概念の導入によってうまくきりぬけている。

Fig. 1の(2)は、物体AとBとの摩擦面(○でかこ

*北海道工業大学教授
Professor, Hokkaido Institute of Technology
原稿受理 昭和57年11月19日

った部分) を顕微鏡的に拡大した模式図である。鏡のような滑面でも顕微鏡で拡大すると凹凸があるので、AとBは全面で完全に接触しているわけではない。この局部的に接触している部分が真実接触面積であって、摩擦抵抗はここで発生しているのである。真実接触面積の大きさは、みかけの接触面積とは無関係に、物体の重さが増すとふえると考えれば、FがWにのみ比例するという実験事実は納得できるわけである。したがって、固体摩擦の研究は、真実接触面積を正しく測定すること、そして、そこで何が起きているかを解明することにつきるといっても過言ではない。

Fig. 1の(3)と(4)は、真実接触面で生ずる代表的な摩擦抵抗の要因を模式的に示したものである。図(3)では、滑走体Aの突起aとbとがB面の突起1と3と真実接触していることをあらわしている。突起の大きさは顕微鏡的スケールであるから、真実接触面積には大きな応力が発生していると考えられることができる。ここでは、物体Aを構成している原子(または分子)とBを構成する原子(または分子)が接触面をはさんで、互いに分子間力を及ぼす距離にあるだろう。いいかえると凝着または付着が起きているのである。AをBに対し滑らせるためには、この真実接触部の凝着力(付着力)に打ち勝たなければならない。これが摩擦抵抗の1つである。

さて、Aが少し移動して(4)の状態になったとすると、Aの突起aとbはこんどはBの突起2と4とかみ合うことになる。ちょうど錨をうったようなので、これを投錨効果という。投錨効果も摩擦抵抗の大きな要因の1つである。Aがさらに右に滑ろうとすると、Aの突起はBの突起をのりこえるか、さもなくば突起の天辺を削りとらねばならない。こんなときは摩擦面には擦痕(スクラッチ)ができ、摩擦が生ずる。摩擦が激しい面では当然 μ_k の値も大きくなる*。

固体摩擦をへらす最も簡単な方法は、摩擦面に注油することである。注油は固体摩擦を流体摩擦におきかえることで、これを「潤滑—Lubrication」という。摩擦面に油が入ると、AとBは少し分離して真実接触面積がへるし、両面の突起は油膜をはさんで接触するので、真の凝着は起こらない。摩擦抵抗は主として油の内部の分子間の摩擦になってしまう。極端な例として、摩擦面に空気を噴射したり、磁石の反撥力を利用して滑走体を完全に浮上させると、真実接触面積は0になり、摩擦も空気分子の内部摩擦だけになる。

ところで、スキーやスケートが固体摩擦であるの

*北海道では、車のスリップ事故防止のため、スパイクタイヤを使用するが、スパイクタイヤのスパイクは、まさに投錨効果を利用してスリップを防ぐためのものである。

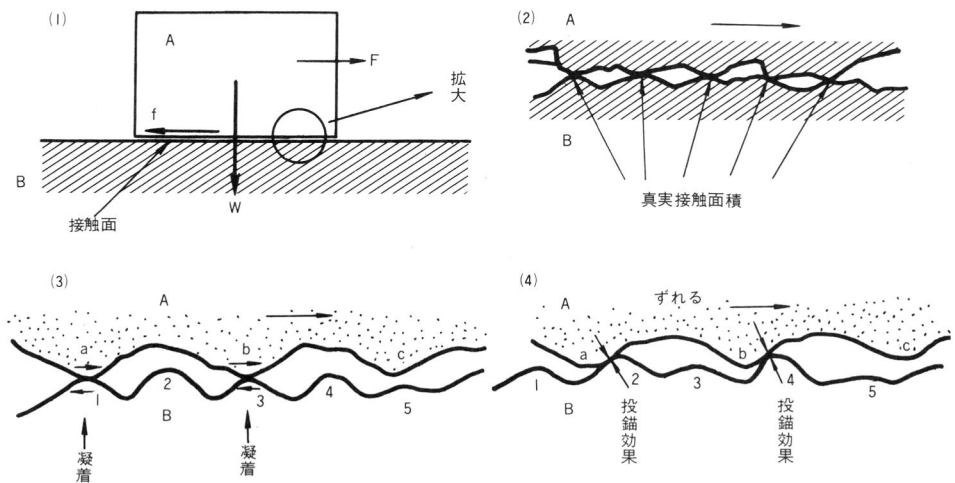


Fig. 1 摩擦の原因
Mechanism of solid friction

- (1) 物体AがBと接触して運動しているとき接触面の一部(丸でかこんだところ)を拡大すると
- (2) のように部分的に接触している。真実接触面積はみかけ面積より小さい。
- (3) 真実接触面は凝着している。
- (4) Aをずらすと凝着部分はきれて投錨効果がおこる。

に、なぜよく滑るかを説明する方法として、摩擦面では氷がとけて水になり、潤滑の作用をするのだと説明されてきた。自ら潤滑剤をつくるという意味で、自己潤滑作用 (Self Lubrication) という。現在のところ、雪や氷がよく滑る原因として自己潤滑作用を疑うわけにはいかない。しかし、自己潤滑作用が起こりにくい条件のときでも、雪や氷の μ_k は他の固体に比べるとかなり小さいのである。これは氷に固有のすべりやすい性質があるのではないだろうか？

3. 氷の自己潤滑作用とスケートの滑走

スキーやスケートが氷の自己潤滑作用で滑るとなると、 0°C 以下の低温で氷がとける条件を考えなければならない。通常の水は、氷と接触した状態では、 0°C 以下の低温での存在が許されないからである。 0°C 以下の低温で氷がとける条件として、圧力融解説と摩擦融解説とがあって、長い間争われてきたが、最近では摩擦融解説に落ち着きつつあるようである。

まず、圧力融解説から検討してみよう。すべての物質の融点は圧力で変わる。純粋の水の融点が 0°C であるというのは圧力が1気圧のときである。 0°C 以下の低温で氷に加圧すると氷がとけるのは、融点が1気圧のときに比べて低くなるからである。降下度 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{T_0 (V_l - V_i)}{\lambda} P$$

で与えられる。ここに T_0 は圧力1気圧での氷の融点、 V_l と V_i は単位質量の水と氷の容積=比容、 λ は氷の融解潜熱、 P は氷に加えた圧力である。よく知られているように、水は凍ると体積が膨張するので分子の $(V_l - V_i)$ は負の値である。したがって、 P を増すと氷の融点は降下する。

この式の常数に必要な数値を入れて計算すると、圧力 P (atm) が1気圧増すごとに、 $\Delta T = -0.0075^{\circ}\text{C}/\text{atm}$ だけ融点が下がることになる。たとえば、 $P = 1000$ 気圧とすると $\Delta T = -7.5^{\circ}\text{C}$ となり、1000気圧の圧力をうけている氷は環境温度が -7.5°C 以上ではとけて水になる。

スケートが氷の圧力融解による潤滑作用で滑るのではないということは、次の大ざっぱな計算で納得できる。スケートの刃の幅を1mm、氷と接する長さを30cmとすると、1枚のスケートの刃が氷を押しつける面積は 3cm^2 だから、2枚では 6cm^2 である。スケートの刃の底と氷との真実接触面積を仮に5%と

仮定すると 0.3cm^2 である。選手の体重を60kgとすると、単位面積当りの圧力は $200\text{kg}/\text{cm}^2 \approx 200$ 気圧である。 ΔT は $\Delta T = -0.0075^{\circ}\text{C} \times 200 = -1.5^{\circ}\text{C}$ となる。したがって、氷温が -1.5°C 以上のときは快適に滑れるが、 -1.5°C 以下では氷はとけないので、快適には滑れないことになる。スケートの刃の場合、真実接触面積を5%と見積もったのは少し低すぎるので、実際はもっと大きいであろう。そうすると、圧力による融点降下はもっと小さい値になる。

次に、摩擦によってどれだけ氷がとけるかを検討しよう。スキーやスケートの真実接触面で摩擦によって1秒間にとける氷の量は、摩擦抵抗を F 、スキーやスケートの滑走速度を v とすると、摩擦のために失われる運動のエネルギー ($F \times v$) に比例する。もちろん、このエネルギーが全部真実接触面で氷をとかすのに消費されるわけではない。発生した摩擦熱の一部は熱伝導によって温度の低いスキーやスケートの本体と、下の雪や氷の実質部の方へ逃げていき、残りが氷をとかすのに使われるのである。

Fig. 2は、実験室で雪や氷の μ_k を測定するための装置である。スケートやスキーの代わりに、滑走体として同図のAに示すように、銅鉄製のリングや透明なプラスチック製のリングを使用する。実際は、リングを歪計をはりつけた回転計に固定し、リングの底に接触させた雪や氷の方を回転させる。図でCはリングにのせる重り、Bは雪または氷を入れた円形の回転皿である。Bは電動機によって任意の速度で回転させることができる。Bの雪や氷が回転すると、これに接触しているリングは摩擦のため少しねじれるので、トルクが発生する。この値を歪計で測定すれば、摩擦抵抗を求めることができる。

透明なプラスチックリングの場合は、真実接触面積の測定と接触面でほんとうに氷が摩擦融解を起こ

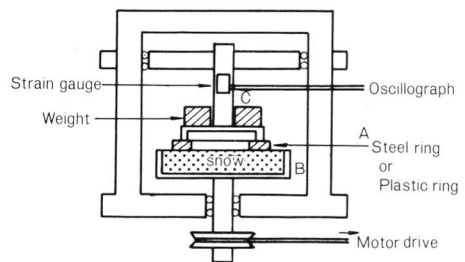


Fig. 2 雪や氷との動摩擦係数を測る装置¹⁾
Device for measuring the coefficient of kinetic friction of snow and ice

しているかどうかを観察することができる。ちなみに、重りCをのせたリングの底面は、常に回転しつつある雪や氷の面を垂直に押すように設計されている。

Fig. 3(A)は、摩擦している透明なアクリル板と雪粒との真実接触面を示す。図でs、t、uと印した平らな部分が、アクリル板と雪粒とが摩擦して氷がとけて平らになった真実接触面である。このときの雪温は -4°C 、回転速度は $v=6\times 10^{-2}\text{m/sec}$ であった。Fig. 3(B)は温度 -2°C 、 $v=9.7\times 10^{-2}\text{m/sec}$ で5分間連続回転したときのアクリル板と雪粒の摩擦面である。摩擦熱でとけた水が流れ出し、滑り方向につらら状に凍っていることがわかる。接触面では摩擦融解と同時に摩擦も起こるので、ちぎれた細かい氷片がつららにまつわりついている。

また、温度を -20°C に保ち、プラスチック板に90kgの重りをのせ、平らな氷面と接触させ、 $v=10\text{m/s}$ で回転した。回転を始めると間もなく、 -20°C という低温にもかかわらず、摩擦面に水膜の発生がみとめられ、回転を続けていくと融解水は遠心力でリングの外ににじみ出して、リングの縁に放射状のつららをつくった。このとき測定された氷の μ_k は0.04という小さい値であった。

以上の実験は、氷の自己潤滑は圧力融解で起こるのではなく、摩擦融解で起こることを示している。ただ、この実験で注意すべきことは、スキーやスケートのモデルになっているのは端のないリングという点である。実際のスキーやスケートが滑走するときは、スキーやスケートの底は常に新しい雪面や氷面を摩擦する。しかし、この実験では、リングの底はいつも同じ雪面または氷面を摩擦しているのである。したがって、界面で発生した摩擦熱によって氷の温度は次第に上昇し、とける水の量も時間の経過と共にふえていくのである。ちなみに、プラスチックリングの代わりに銅鉄製のリングを使用したときは、摩擦のできる水の量は少なく、また、リングの縁にできるつららも小さかった。

Fig. 4は、イギリスのパウデンが熱伝導のよい黄銅でつくった模型スキーと熱を伝えにくいエポナイトの模型スキーを使って、氷の μ_k を温度の関数として測定したものである。この図で明らかなように、氷の温度が低いと μ_k の値が大きくなるのは、温度が低いと発生した摩擦熱は伝導によって冷たいスキーと氷の方に逃げ、氷をとかすのにあまり使われない。したがって、潤滑作用をする水は少ししかできず、

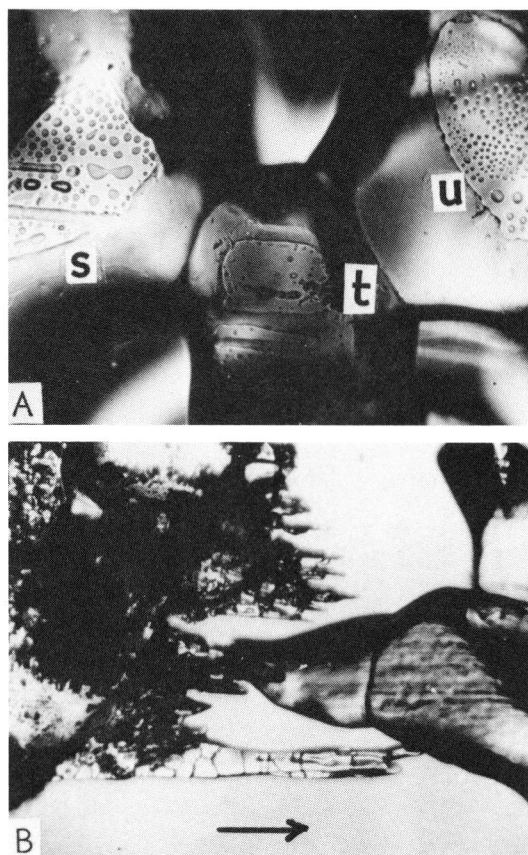


Fig. 3 雪とプラスチック板との摩擦¹⁾
Friction between a transparent plastic plate and snow

注) A は雪柱とプラスチック板との真実接触面積
B は摩擦融解でとけた水が凍ってできたつらら

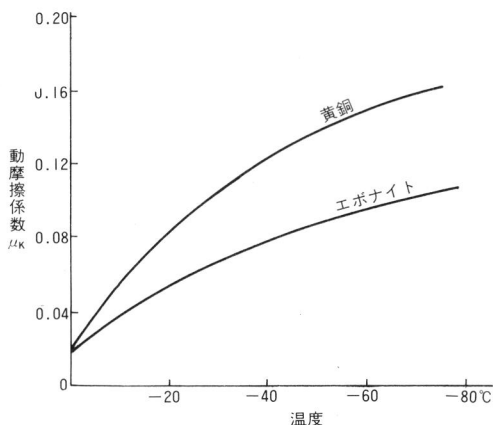


Fig. 4 氷の μ_k の温度特性²⁾
Temperature dependence of μ_k of ice

μ_k は大きな値になる。熱を伝えにくいエポナイト製のスキーの方が熱伝導の大きい黄銅よりも μ_k の値が小さい。

Fig. 5 は、北海道大学低温科学研究所が、1972年の札幌オリンピックの始まる前にスピード競技に使われる本物のスケートを使って、天然の湖の水の上につくられたリンクと人造氷のリンクについて水温とスケートの滑りやすさとの関係を調べたものである。実物のスケートを使っての研究は、これまであまり行われていなかった。オリンピック選手にスケートリンクの水の上を滑ってもらい、 μ_k の値が水温でどう変わるかを測定できれば理想的であるが、人間が滑るとなると個人差もあり、実験条件を一定にして測定することがむずかしい。それでスピード競技用のスケートの刃を2枚平行に固定し、その上に人間の体重に等しい荷重をのせ、特別に設計したカタパルトによって氷上に一定の初速度で打出し、停止するまでの滑走距離を水温の関数として測定することにした。

Fig. 5 の曲線(1)は蓼の湖の天然水のリンク、(2)は端浪の人造氷のリンクの上で測定したスケートの滑走距離の温度変化である。初速一定で打出されたスケートの滑走距離の温度変化は、特定の水温のとき極大となり、水温がそれより高くても低くても、滑走距離は短くなる。スケートが最も滑りやすい水温は蓼の湖では -1°C 、端浪の人造氷では -2°C であった。水温が低くなるとスケートが滑りにくくなるのは、自己潤滑のできる水の量がへるからとして説明できる。しかし、水温がきわめて 0°C に近いときは潤滑作用をする水は多くできるのに、スケートはあまり滑らない。この理由は、多分、水温が融点に近いと氷質がやわらかくなり、スケートの刃が深く氷にくいこんで、抵抗が増すからだと考えられる。水温が 0°C になってリンクの氷がとけだし、びしょびしょになるとかえって水の流体抵抗が増え、スケートの滑りを妨げるだろう。

蓼の湖と端浪リンクの実験で、水温が $-1^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ のとき、スケートは最もよく滑ることがわかった。しかし、室内のスケートリンクならともかく、戸外のスケートリンクでは、水温をいつでも長時間、最適温度に保つことはむずかしい。それでは、水温が低くてスケートが滑らないとき、よく滑るようにするにはどうすればよいか？ スキーの場合には、低温用ワックスを塗る方法もあるが、スケートの刃は鋭いので、ワックスを塗ってもちょっと滑っただ

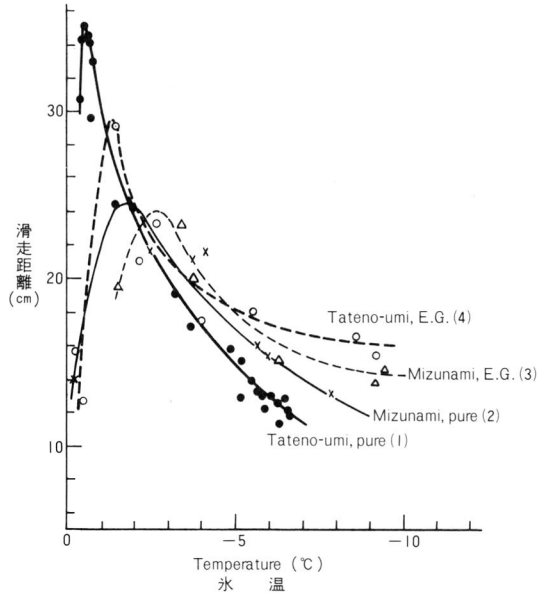


Fig. 5 水温とスケートの滑走距離³⁾
Temperature dependence of slide distance of skate catapulted on the surface of ice
注)実線(1)蓼の湖リンク(天然水) (2)端浪リンク(人造氷)
点線(3), (4)エチレングリコールを氷の上にぬる

けでワックスはすぐとれて役に立たないであろう。水を滑りやすくする1つの方法は、氷の表面を何らかの方法で潤滑すればよい。

Fig. 5 の点線(3)と(4)は、蓼の湖と端浪リンクの氷の上に、不凍液のエチレングリコールを薄く塗って実験したものである。エチレングリコールは氷の融点を下げる性質があるので、これを塗ると水温が低くても氷の表面はとけて、水溶液の膜ができる。これが潤滑剤の役目を果たすことになる。点線(3)と(4)にみられるように、低温度においてエチレングリコールを塗った氷の上では、スケートの滑走距離は塗ってない氷面、(1)、(2)に比べて約50%長くなっている。

Table 1 は、蓼の湖の天然氷と端浪の人造氷のリンクで測定されたスピード競技用スケートに対する氷の μ_k の値を示す。Fig. 5 のカタパルトで打ち出されたスケートの滑走距離の温度特性から予想されるように、 μ_k の値は温度低下と共に大きくなって

Table 1 スケートと氷との間の動摩擦係数 (μ_k)
Coefficient of kinetic friction between skate and ice

	-0.5°C	-2°C	-5°C	-10°C
蓼の湖	0.0031	0.0042	0.0066	0.0102
端浪リンク	0.0078	0.0042	0.0066	0.0102

いく。 μ_k の最小値は、氷温が -0.5°C での夢の湖の水の0.0031という値であった。この値は、スケートをはいて氷上に立っている体重60kgの選手を、わずか180gという小さい力で引っ張ることができることを意味している。氷温が -10°C の低温では、摩擦熱はスケートと水の方に逃げ、潤滑に役立つ水の量はへる。その結果 μ_k は増すが、それでも μ_k は1/100という小さい値であることに注意したい。

4. 氷の結晶には固有の滑りやすい面がある
(結晶面と μ_k の関係)

前項では、スキーやスケートが氷の自己潤滑作用で滑ることを説明した。摩擦融解で氷がとける量は、真実接触面での摩擦抵抗 F と滑走体の速度 v との積($F \cdot v$)に比例するから、温度が低くかつ滑走速度が小さいときは自己潤滑作用では滑れないことになる。しかし、そんなときでも氷の μ_k の値は1/100のオーダーの小さい値を示すのである。摩擦の専門家の言によると、固体摩擦係数が1/100というのは、まさに驚異的に小さい値だそうである。それなら、氷は自己潤滑を生じなくても、なぜ μ_k の値が小さくなるのだろうか？ 本項では基本的な氷の結晶構造にまで立ちいって考察をすすめてみよう。

Fig. 6(A), (B)は典型的な雪結晶を示す。Aは樹枝状結晶、Bは角板結晶で、大きさは通常0.5~4mmぐらいで六方晶系に属する結晶である。結晶学では、六角形の辺の方向をa軸、3本のa軸を含む面(紙面)を「底面」といい、底面に垂直な方向を主軸またはc軸という。Bの六角板結晶は底面が広く、厚さの薄い結晶であるが、もし、この結晶が主軸の方向に成長すると六角柱ができる。六角柱の側面を「柱面」という。いいかえると、B結晶は厚さの薄い六角柱で底面に比べ、柱面の薄い結晶である。

樹枝状や角板結晶がふわっと地上に積もったのが新雪である。新雪は時間がたつと、とけなくても丸い氷の粒の集合「しまり雪」に変わる¹¹⁾。Fig. 7はしまり雪の組織を示す顕微鏡写真である。雪結晶はすべて大きさが0.5~1mmの水粒となり、立体的につながっている。スキー場で滑る雪は、大いこのような構造をもったしまり雪である。

さて、液体の水が凍って氷の結晶になると、水分子はどんな配列をするだろうか？ Fig. 8の図(1)は氷の結晶構造を示す。水分子 H_2O は、酸素1個と水素2個からできている。図で白丸は酸素、黒丸は水素をあらわす。白丸の酸素は正四面体の頂点と重心

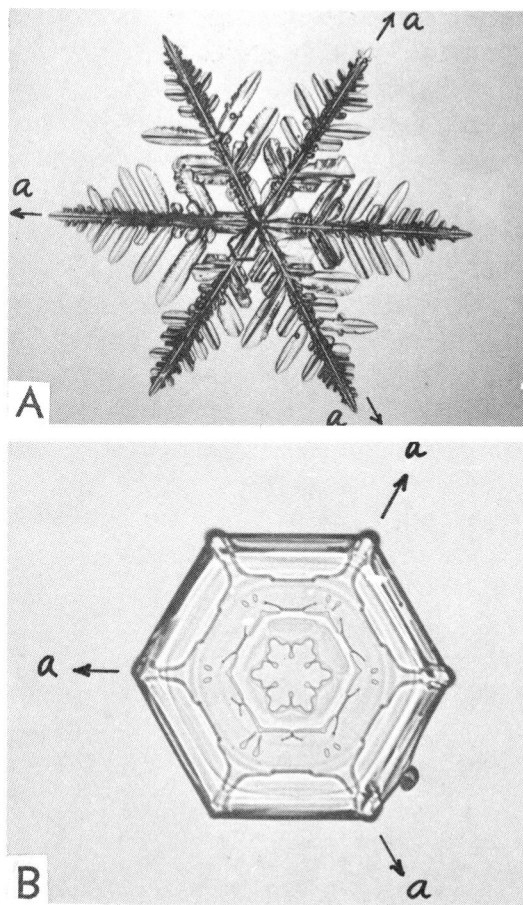


Fig. 6 A 樹枝状結晶
Dendritic snow crystals
B 角板結晶
Plate-like snow crystals

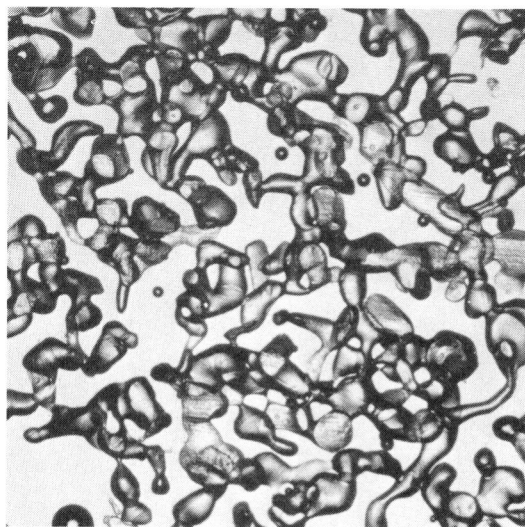


Fig. 7 しまり雪の組織
Thin section of fine grained snow

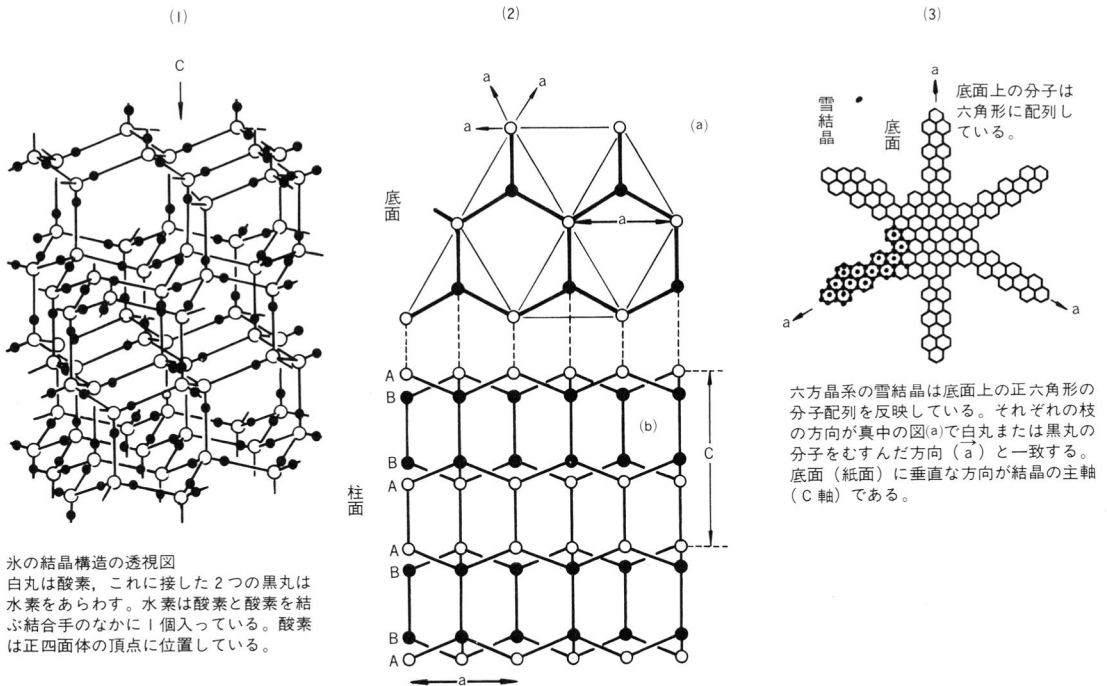
の位置にあり、空間的につながっているので、全体として隙間の多い構造になっている。このため水→氷になると体積が10%ふえるのである。

この立体構造をc ↓の方向から見た図が(2)の(a)である。c ↓の方向からみると水分子は六角の蜂の巣のように配列している。白丸と黒丸はそれぞれ水分子をあらわしているが、白丸のならんでいる分子面は、黒丸のならんでいる分子面より少し上にある。同一分子面内で白丸、または黒丸を細い線で結ぶと、正三角形が6つ集合して正六角形ができる。この正六角形の面が底面である。主軸はこれに対し垂直の方向である。白丸、または黒丸を結んでできる六角形の辺の方向 \vec{a} は Fig. 6 の雪結晶の a 軸の方向と一致する。

(2)の(b)図は、主軸に対し直角方向からながめた水分子の配列で、Fig. 6 の雪結晶 B でいうと、六角板

の側面(柱面)の方向からながめた分子配列である。最上層の A 分子層(白丸)とその下の B 分子層(黒丸)は、それぞれ(a)図の白丸と黒丸の配列している底面を真横からながめたことになる。氷の結晶構造は、柱面の方からみると底面が ABBAAB……のように、あたかもトランプのカードを積み重ねたように配列していることになる。底面上の分子間距離 a は 4.5\AA ($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)、柱面での当価な分子間距離 c は 7.35\AA である。

Fig. 8の(3)図は、雪結晶の底面の分子配列を模式的に示したもので、雪結晶の六角形の形はまさに六方晶系の氷の結晶構造を外形に反映しているのである。雪結晶のように、どこをとっても分子の配列、いかえると主軸の向きがそろっている結晶のことを単結晶という。Fig. 7のしまり雪の丸い氷の1粒も外形こそ六角形ではないが、分子が同じ方向にな



氷の結晶構造の透視図
白丸は酸素、これに接した2つの黒丸は水素をあらわす。水素は酸素と酸素を結ぶ結合手のなかに1個入っている。酸素は正四面体の頂点に位置している。

Fig. 8 氷の結晶構造
Crystalline structure of ice

(a)は左の立体図でcの方向から見たときの酸素の配列を示す。水素の位置は省略して描いていない。白丸の分子のならぶ分子面は上、黒丸の分子のならぶ面は少し下側にある。白丸も黒丸も同一分子面上では正六角形に配列している。この分子面を底面という。(b)図は左の透視図のcの方向に対し直角にみたときの分子配列。最上層のA分子面は(a)図の白丸のならぶ底面を、B分子面はそれより少し下の黒丸のならぶ底面を真横からながめていることになる。

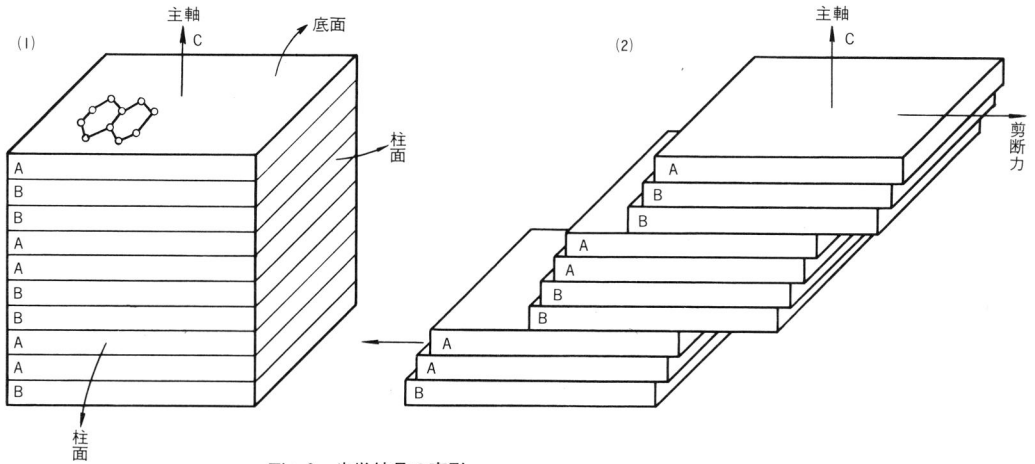


Fig. 9 氷単結晶の変形
Slip deformation of single crystal of ice due to shear stress

らんだ単結晶粒である。そのわけは雪結晶がとけずに形を変えたただけだからである。ただ1個の雪粒とこれに隣接する雪粒とは主軸の向きが異なっている場合が多い。天然の湖の氷も、人工のスケートリンクの氷も液体の水が凍ってできた氷であるが、大きさが数mmから数cmの主軸の向きが異なる単結晶粒の集合体である。単結晶の集合を多結晶という。

さて、氷の μ_k と結晶構造との間にどんな関係があるだろうか？ その関係は外力に対する結晶の変形の仕方である。Fig. 9の(1)は四角に切った単結晶で、底面がABBAAB……のかたちに、トランプカードを積み重ねたように並んでる様子が模式的に示されている。ところで、この氷単結晶の底面または柱面に垂直な力をかけ、結晶を圧縮しても引張ってもほとんど変形することはない。ただ、(2)図のように相対する底面に平行にずりの力(剪断力)を加えたときだけ結晶は容易に変形する。相対する柱面にずりの力を加えても変形は起こらない。

なぜ、底面にずりの力を加えると容易に変形するかというと、図のように底面(つまりトランプカード)の間で滑りが起こってずれるからである。Fig. 8の結晶構造(2)(b)の図でいえば、A-B、B-B、A-A間の分子結合が切れて横にずれるのである。しかし、ただほんの1分子距離だけずれるといっても、1cmあたり何千万本もある結合手を一斉に切ってずれることになるので、理論的には大きな力があることになる。ところが、実験してみると、理論値の1/10,000以下の小さい力でずれが起ることがわかっている*。

この事実は、自己潤滑のない場合の氷の摩擦に大

きな意味を持つのである。たとえば、Fig. 1の(3)図の模式図で、スケートAと氷Bとの真実接触面で凝着が起こっているとしよう。仮に、氷の突起1は結晶底面でaと凝着しているが、突起3は氷の柱面でbと凝着しているとしよう。AがBに対し右に滑ろうとすると接触面ではずりの力が働くが、ずりの力は1の部分では氷の底面を、3の部分では柱面を剪断することになる。1の突起は容易に滑り変形を起こすのでずりに対する抵抗は小さい。しかし、突起3は変形せず、激しくずりに抵抗するだろう。そして、無理にずらそうとすると、突起3の柱面は激しく摩擦してしまうだろう。同様な事情は、Fig. 1(4)図の投錨効果についてもいえるのである。

それでは、氷の自己潤滑が起こらない条件で氷の単結晶の底面と柱面を摩擦したとき μ_k の値はどれだけ異なるだろうか？

Fig. 10の(a)図は、2個の大きな氷の単結晶の底面と柱面を貼り合せ、表面を滑らかにして、鋼鉄製のボールベアリングでゆっくりと柱面の上から底面の上へ摩擦した実験である。氷温は -10°C 、摩擦速度 $V=7.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、ボールにかかる加重は1600grであった。滑走体をボールベアリングにしたのは、接触面を氷を通して顕微鏡でのぞいたとき、真実接触面積を算定するのに比較的楽にできるからである。摩擦速度が大変小さいので、氷の自己潤滑は起こらない。

Fig. 10の(b)図は、柱面→底面へのボールの移動距離に対する μ_k の変化(この変化は力Fの変化とし

*この理由の詳しい説明は転位論によらねばならないので省略する(詳しいことは文献10)を参照のこと。

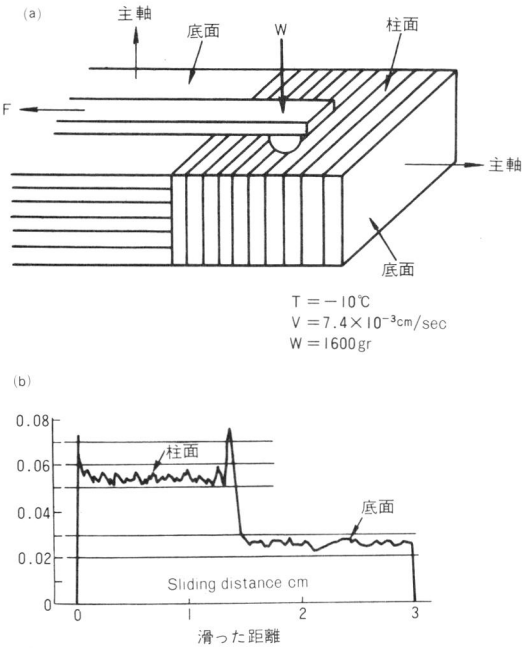


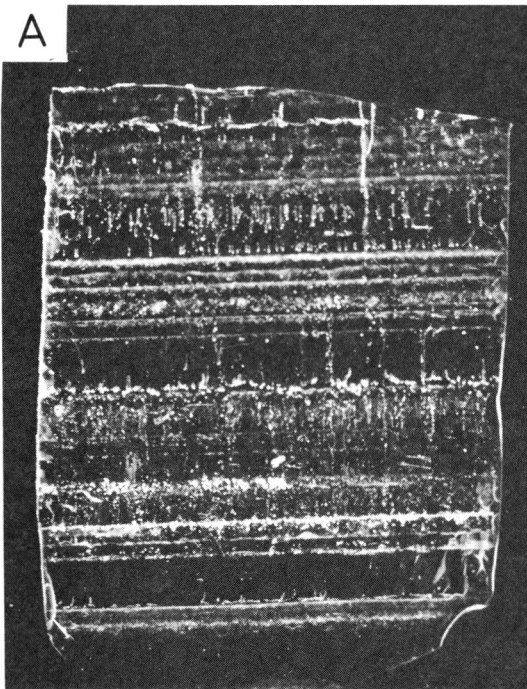
Fig. 10 単結晶氷と鋼球との摩擦⁴⁾
Friction between a steel ball and single ice crystals

- (a) 鋼球で氷単結晶の柱面と底面を摩擦する
- (b) 鋼球が柱面から底面に移ると摩擦係数が急に小さくなる。

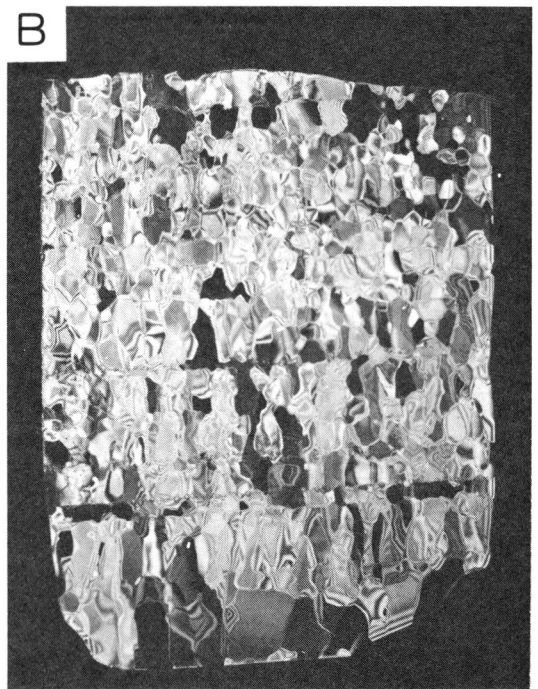
てもよい)の図を示す。図のように柱面での μ_k (またはF)は、ほぼ0.055という値を中心として、ギザギザの変動をくりかえして行く。そして、ボールが柱面と底面との結晶境界をこえるとき大きくジャンプするが、底面に移ると μ_k は急に小さくなり、ほぼ0.025になる。

この実験は、銅鉄製のボールは氷の結晶底面の上では柱面の上よりも2倍もよく滑ることをあらわしている。そして、柱面上で μ_k の値がギザギザの変動をするのは、真実接触面で凝着と投錨効果が生じたり切れたりするからである。摩擦抵抗がふえたり、へったりする滑り方をStick-slip現象という。柱面では、積み重なったカードの側面をこするのでStick-slipを起こしやすいと考えられる。実験が終わったあと、ボールが滑ったあとの摩擦痕を顕微鏡で調べてみると、柱面での摩擦が底面での摩擦よりもはるかに大きかった。このことも、底面の μ_k が柱面の μ_k よりも小さいことを裏付けている。

Fig. 10の単結晶氷の摩擦実験の結果から、次のような推論をすることができる。それは、スケートの滑りをよくするためには、リンクの氷はなるべく大きな単結晶になるようにして、しかも、結晶底面が



普通写真
 Ordinary light



偏光写真
 Polarized light

Fig. 11 人工のスケートリンクの氷³⁾
Thin sections of ice formed in a skate rink

表面に露出するようにつくればよいということになる。しかし、これは冷凍機で急速冷却してつくる人造氷のリンクでは大変むずかしい。

水を冷凍機で冷やした床の上に散水して凍らせ、何段にも氷層を積み重ねてつくるリンクの人造氷は、Fig. 11-A の断面写真にみられるように、多くの気泡を含んでおり、また、Fig. 11-B の偏光写真のように、大きさが数 mm から 1 cm ぐらいの単結晶氷の集合（多結晶氷）になっている。しかも、表面における主軸の向きはまちまちである。結晶粒が小さいと、単位面積当りの結晶境界が多くなる。結晶境界は Fig. 9 の実験のように滑走体がこの上を通過するとき抵抗になる（ μ_k のジャンプがおこる）。そのわけは、結晶境界には不純物が析出しているのとけやすく、また昇華も起こりやすい。その結果境界のところは溝になりやすいので、スケートの滑りをさまたげる。これに比べると、天然の湖水はゆっくり冷えていくので、結晶粒の大きさは人造のリンク氷よりずっと大きくなり、直径が数 cm のものは珍しくない。

天然の湖水は、時として非常に広い面積にわたり結晶主軸を垂直にして、凍結することがある。この場合には、結晶底面が広く表面に露出する。Fig. 12 はアラスカのピーター湖の全景で、ここの氷がその 1 例である。写真の白っぽい氷は、結晶主軸が湖面に垂直、灰色にみえる氷は主軸が水平で、結晶の柱面が表面に露出している。こんな湖水では、スケート競技は白っぽい氷の上で行う方が滑りやすいことになる。Fig. 13 は、偶然に DC-3 という飛行機がこの湖水の上に車輪で着陸したときできた摩擦痕を示すが、主軸が水平に寝ている灰色の氷の部分は激しく摩耗して深さ 20cm の溝ができたのに、主軸が垂直になっている白っぽい氷の上では底面滑りのため、へこみはほとんどできなかったといわれている。

5. 氷の表面を覆う擬似液層と付着力

自己潤滑作用がなくても氷がよく滑る要因の 1 つとして、底面すべりの他に、擬似液層説が考えられる。氷の表面は 0°C 以下の低温でも、常に液体のような擬似液層で覆われているというのがその考えである。もし、氷の表面がかなりの厚さの擬似液層で覆われているとすれば、滑走体と氷との間の真実接触面では完全な凝着は起こらないことになり、摩擦抵抗はへるであろう。

通常の水は、0°C 以下の低温度でも凍らない

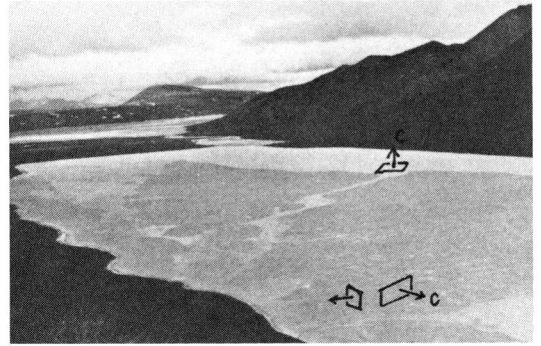


Fig. 12 アラスカ、ピーター湖
Peters Lake, Alaska



Fig. 13 ピーター湖の氷上に着陸した DC-3 の車輪の摩擦痕
The surface of Peters Lake showing patches of c-axis-vertical ice in the c-axis-horizontal ice (the tack of a taxing DC-3 airplane)

で、液体のままであることができる。この状態を過冷却という。しかし、過冷却している水は不安定で、固体の水と接触したままで存在することはできない。それ故、0°C 以下の低温で氷の表面を覆っていると考えられる擬似液層は、通常の過冷却水とは異なった構造と性質をもっていなければならない。もともと擬似液層の概念は、0°C 以下の低温で、表面が乾いている氷の粒が大変付着しやすい性質をもっていることを説明するために導入されたものである。

中谷と松本⁵⁾は、氷の粒の付着力を測定するため、2つの氷球を糸でつるし、1分間接触させてから引き離すときの力を測った。このようにして測定される氷の付着力は、温度が低いと小さく、0°C に近いほど大きくなった。このとき観測された面白い現象は、付着している2つの氷球を左右に引っ張って離そうとすると、氷球はくっついたままで互いに逆に回転して離れるのであった。温度が0°C に近いほど氷球の付着力が大きいことと、氷球がくっついたままで回転する現象とは、氷球の表面が擬似液層で覆われていて、その粘着性でくっついている。層の厚

さは温度が高いほど厚くなると考えるとうまく、説明できる。

Fig. 14 は、中谷と松本の実験を同じ方法で追試した Hosler 等の測定結果である。氷球を吊している環境が水蒸気で飽和しているときは、付着力は曲線 A のような変化をした。温度が -25°C 以下の低温では、付着力は小さくなり、ほとんど測定できなかった。また、環境の湿度が乾いているときは、擬似液層は蒸発して薄くなるので、付着力は曲線 B のように小さくなった。

Fig. 14 に示したような擬似液層の厚さの温度変化は、氷とスケートやスキーとの摩擦にも大きな影響を与えるだろう。Fig. 15 は、Jellinek が氷でサンドウィッチされたステンレスの板を静かに引っ張って、板が滑り出すときの力を温度の関数として測定した結果である。このときの力は、ステンレス板と氷との剪断付着力と考えることができる。剪断付着力は温度が 0°C に近いときは小さく、-12°C までは温度低下と共に増大したが、-12°C 以下ではほぼ一定になった。そうして、0°C ~ 12°C の間では、ステンレ

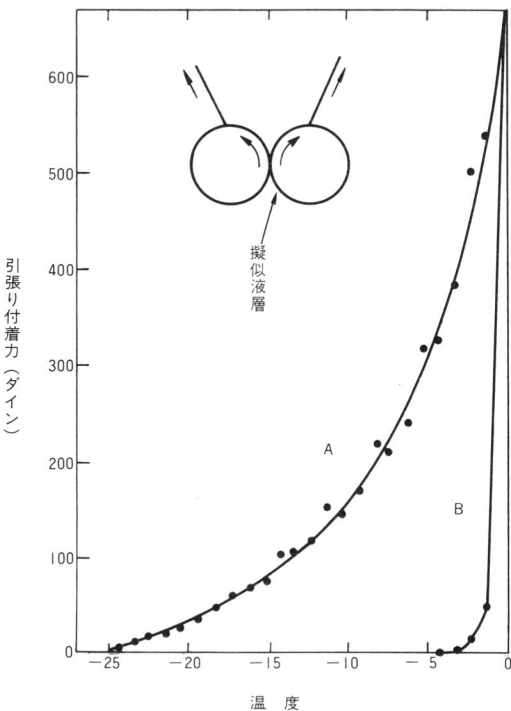


Fig. 14 附着した氷球を引離すのに必要な力の温度特性⁷⁾
 Temperature dependence of adhesive force between two ice spheres
 注) A は飽和水蒸気中での測定、B は乾燥空气中での測定。

スの板は引っ張ると氷と氷の間を滑らかに抜けたが、-12°C 以下で板は滑らかに滑らず、氷片の一部がステンレス板の表面にくっついて抜けてきた。

この実験結果も、氷の表面には擬似液層があり、温度が高いと層の厚さが厚くなると考えるとうまく説明がつく。すなわち、温度が 0°C に近いと、厚い擬似液層が氷と板との凝着をさまたげている。したがって、板は小さい力で滑らかに動く。温度が下がると、液層は薄くなるので凝着部分がふえ、付着力が増す。-12°C 以下になると、擬似液層の厚さは極端に薄くなり、しかも氷とステンレス板との間の凝着力が氷内部の分子間力(凝集力)に打ち勝つので、氷片の一部が破壊して板にくっついて、抜けてくると考えられる。

それなら、氷の自由表面に存在を許される擬似液層の厚さは一体どれくらいか？ 前にも述べたように、擬似液層は過冷却した通常の液体の水ではない。したがって、その分子構造は表面では乱れた液体の状態であるが、深くなるに従って氷の構造に近づいていく遷移層の形をもっているであろう。

Fig. 16 は、このような考えにたつて、Fletcher が理論的に計算した擬似液層の厚さと温度との関係である。その厚さは -10°C でほぼ 40Å (1 Å = 10⁻⁸ cm) の厚さである。温度が 0°C に近づくに従って、その厚さは急に厚くなっていく。氷の表面に存在する

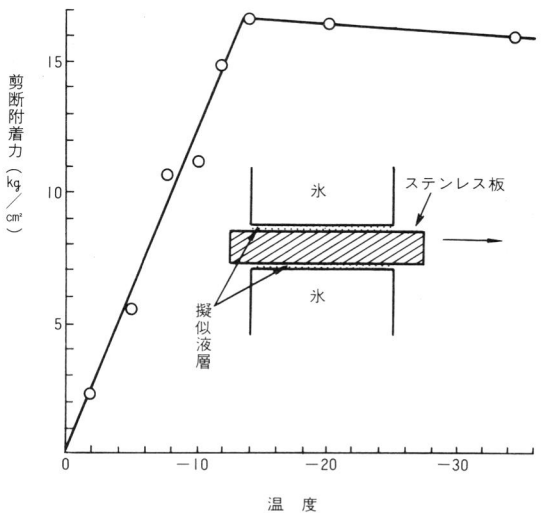


Fig. 15 氷とステンレス板との付着力の温度変化⁸⁾
 Temperature dependence of adhesive force (shear force) between ice and stainless steel plate

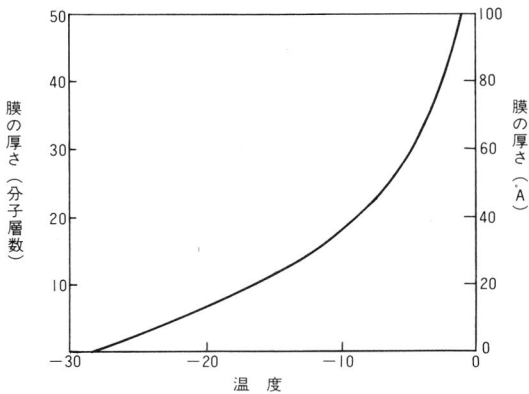


Fig. 16 氷の表面の擬似液層の厚さと温度との関係⁹⁾
Relation between temperature and thickness of the quasi-liquid layers existing on the ice's surface

擬似液層は、摩擦や付着というような界面の力学的性質に関係があるだけでなく、水蒸気から昇華によって雪結晶が成長していく場合にも大いに関係がある。そして、結晶の底面と柱面とでは擬似液層の厚さや物性が多少異なることが期待される。現在、結晶成長と関係づけた研究がすすんでいる。

本稿の最後に1つつけ加えておくことがある。それは天然の雪や氷は多かれ少なかれ汚染されていて、不純物を含んでいる。不純物は主として雪や氷の表面または結晶境界に分布している。したがって、雪粒や氷の表面は、不純物を含む水溶液の膜で覆われていると考える方が自然である。水溶液の膜の厚さは不純物の濃度と温度によって変わるが、その厚さは理論的に計算された純水の表面の擬似液層よりもはるかに厚いものと考えられる¹¹⁾。不純物の膜も潤滑の役割を演ずることは、Fig. 5の蓼の湖と端浪リンクで、わざわざエチレングリコールを氷面に塗布した実験によって、すでに明白である。

6. 結語

雪や氷がなぜ滑りやすいか、その動摩擦係数 μ_k

が異常に低くなるいくつかの要因を検討した。結論を述べると次の通りである。

1. 滑走速度(または摩擦速度)が大きいとき(およそ1 m/sec以上)は、摩擦熱で氷がとけてできた水が潤滑作用をして滑る(自己潤滑作用)。
2. スケートが最も滑りやすい氷温は $-1^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ である。氷温がこれよりも高くても低くても、スケートは滑りにくくなる。
3. 摩擦速度が小さく、自己潤滑が期待できないときでも氷の μ_k は小さいが、その要因は底面滑りと擬似液層が寄与していると考えられる。氷単結晶の摩擦では、底面の方が柱面より滑りやすく摩擦も少ない。

参考文献

- 1) 藤岡敏夫：スキーの研究(3), 低温科学物理篇17, 1958
- 2) Bowden and Tabor: Friction and lubrication of Solid II, Oxford, 1950
- 3) 小林禎作他：テストスケートによるリンク氷の動摩擦係数の測定, 低温科学物理篇28, 1970
- 4) 対島勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究 I ~ III, 低温科学物理篇, 23, 1978
- 5) Knight, C.: Studies of Arctic Lake Ice, Journal of Glaciology Vol. 4, 1962
- 6) Nakaya and Matsumoto: Evidence of the Existence of a Liquid Like Film on Ice Surfaces, Journal of Colloid Science Vol. 9, 1953
- 7) Hosler et al.: On the Aggregation on Ice Crystals to Form Snow, Journal of Meteorology Vol. 14, 1957
- 8) Jellinek: Tensile Properties of Ice Adhering to Stainless Steel US Army SIPRE Res, Rept. 23, 1957
- 9) Fletcher: Surface Structure of Water and Ice, Phil. Mag., Vol. 17, 1962
- 10) 東 晃：寒地工学基礎論, 古今書院, 昭和56年
- 11) 黒岩大助：スキーヤーのための雪の科学, 科学ブックス, 共立出版社, 昭和47年