



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|------------------|---|
| Title | 単結晶氷の摩擦に関する研究 Ⅰ : 鋼球と氷の(0001)面および(0110)面の摩擦に及ぼす荷重、速度、温度の効果ならびに摩擦機構としての凝着説 |
| Author(s) | 対馬, 勝年; TUSIMA, Katutosi |
| Citation | 低温科学. 物理篇, 35, 1-22 |
| Issue Date | 1978-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/18323 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 35_p1-22.pdf |



単結晶氷の摩擦に関する研究 I*

—— 鋼球と氷の (0001) 面および (01 $\bar{1}$ 0) 面の摩擦に及ぼす荷重, 速度, 温度の効果ならびに摩擦機構としての凝着説 ——

対馬勝年

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. 序 論

氷と他物質間の動摩擦係数 (0.05~0.005)^{1)~4)} は非常に小さく, 黒鉛や二硫化モリブデン等の固体潤滑剤の10分の1, テフロンと同程度またはそれ以下である⁵⁾。試験的には μ_k 0.005 程度の低摩擦材料が開発されている⁶⁾ とはいうものの, 氷は地球上に現存する固体の中で最も摩擦の小さい物質といってよいであろう。

このような氷の低摩擦がスキー, スケート, そりといった冬のスポーツを可能にしたのであり, 冬季オリンピックは雪や氷の上での摩擦の祭典ということもできる。

反面, 氷の摩擦の小さいことは厄介な問題を引き起している。雪道や凍結路面での自動車のスリップ, 制動停止距離の増大, 不均一摩擦等による追突, 衝突事故, 交通渋滞, 屋根雪の滑落, 雪崩等は大きな社会問題となっている。しかしながら, 現在これらに対し有効な対策が講じられているとは言い難い。この対策の遅れの根本的な原因の一つに, 氷や雪の摩擦特性, 摩擦機構が十分に解明されていないということが挙げられるであろう。

氷の摩擦係数 μ_k は金属間の流体摩擦に対応する小さい値をもつことが早くから注目されていた。その原因として, 液体が摩擦面に発生し, それが潤滑作用をするに違いないと人々が考えたのも当然の成り行きであった。Joly⁷⁾ の圧力融解説や Bowden and Hughes¹⁾ の摩擦融解説は機構の違いはあるにせよ, いずれも摩擦面に水を介在させたものである。これら両説は非常に有名であるが, 19世紀末から20世紀初期にかけて Reynolds⁸⁾, Skinner⁹⁾, Morphy¹⁰⁾ 等により支持された圧力融解説は接触面で水に加わる圧力が通常氷をとかすのに不充分であることから, 早くから疑問が持たれ, 1930年代の摩擦面の温度上昇に関する業績を背景とした Bowden and Hughes¹⁾ の実験によって決定的に否定され, Bowden^{11), 12)} のその後の研究を通して界面での水の形成を説明する最も確かな説として摩擦融解説の妥当性が確認された。

しかしながら, Bowden らが摩擦融解説の根拠とした二つの実験事実—速度効果と滑走材の熱伝導効果—に矛盾する実験結果が1950年代以降数多く報告され, 水蒸気潤滑説¹³⁾ や水分

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1856号

子回転説¹⁴⁾等も提唱されている。(これら氷の摩擦説に関しては Minnesota 大学¹⁵⁾, Pounder¹⁶⁾, 対馬¹⁷⁾らの解説がある)。しかし、これらの新しい説を支持する研究はまだ行われていない。

氷と他物質とのくり返し摩擦で藤岡¹⁸⁾, 対馬¹⁹⁾により液体の水が摩擦界面に観察されているけれども、以下に述べる理由によって、氷の低摩擦を融解水の潤滑によると結論することができない。

1. 融解の生じないような低速度摩擦に於て、Tabor and Walker²⁰⁾, Barnes ら²¹⁾, Schultz and Knappwost²²⁾, 対馬^{4), 23)}らにより報告されているように、高速度の場合と同程度の小さな摩擦が得られている。このことは氷の低摩擦が融解水の介在と無関係であることを強く暗示している。
2. もし流体潤滑によるとすれば、Evans ら²⁴⁾の計算のように摩擦係数は 0.0004 程度まで小さくならなければならない。これほど小さい摩擦係数は氷では得られていない。
3. 藤岡²⁵⁾, Evans ら²⁴⁾の計算によると、融解に要するエネルギーは全摩擦エネルギーにくらべ極端に小さすぎる(全体の数パーセント)。
4. 藤岡²⁶⁾, Pfalzner²⁷⁾, Niven²⁸⁾らにより指摘されているように、滑走材の熱伝導率と摩擦係数との間に一義的な関係は見い出されない。

上記 4 項目は氷の低摩擦を摩擦融解説では説明できないことを結論している。従来氷の摩擦の研究に於ては、摩擦係数の異常さだけが注目され、氷のもつ力学的性質の特異性は殆んど注目されなかった。

筆者¹⁷⁾は以前行なった氷の摩擦機構の総合解説において、氷のブリネルかたさ(塑性流動圧力)は -10°C で 1000 kg/cm^2 (Butkovich²⁹⁾) と非常に大きいにもかかわらず、同じ温度での氷の剪断強さはわずか 10 kg/cm^2 (Butkovich³⁰⁾) と小さいことに注目し、凝着説によって氷の低摩擦を説明できる可能性を指摘した。そしてその後、実験的検討によって氷の摩擦に関する凝着説を提案した^{4), 31)}。

1930 年代、真実接触面の圧力や面積、摩擦面の温度上昇に関する研究を通して確立されるにいたった凝着説³²⁾では、摩擦の真の原因は摩擦材間に形成される凝着であって、摩擦抵抗は凝着結合部を剪断破壊する力であると考えている。

凝着説によると、摩擦係数 μ は弱い方の摩擦材の剪断強さ s と塑性流動圧力(ブリネルかたさ) p を用いて、

$$\mu = s/p$$

によって与えられる。この式は Amon-ton-Coulomb の摩擦の三大法則に理論的な説明を与えることもあって、摩擦現象を最もよく記述する説とされている。いくつかの物質について s , p および s/p の値を第 1 表に示した。氷以外の金属では s/p は 0.5 前後で、実際の摩擦係数も

第 1 表 氷および各種金属のブリネルかたさ H , 剪断強度 s および s/H の比較

| 物 質 | ブリネルかたさ (H , kg/mm^2) | 剪断強度 (s , kg/mm^2) | 摩擦係数 ($\mu = s/H$) |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 氷 (-10°C) | 約 10 | 0.1 | 0.01 |
| 鋼 | 160 | 90.1 | 0.6 |
| 鉄 | 40 | 16 | 0.4 |
| 銅 | 4 | 0.75 | 0.2 |
| 鉛 | 1 | 0.22 | 0.2 |
| インジウム | | | |

この値をもっている。しかし、氷の s/p はそれにくらべ一桁小さくなっている。つまり、氷が

0.05 程度の μ をもつことは凝着説の立場から見て何等不思議はないのである。 μ が小さい理由として、氷は荷重を支える能力は大きいのに、剪断強さが極端に小さいことを挙げることができよう。

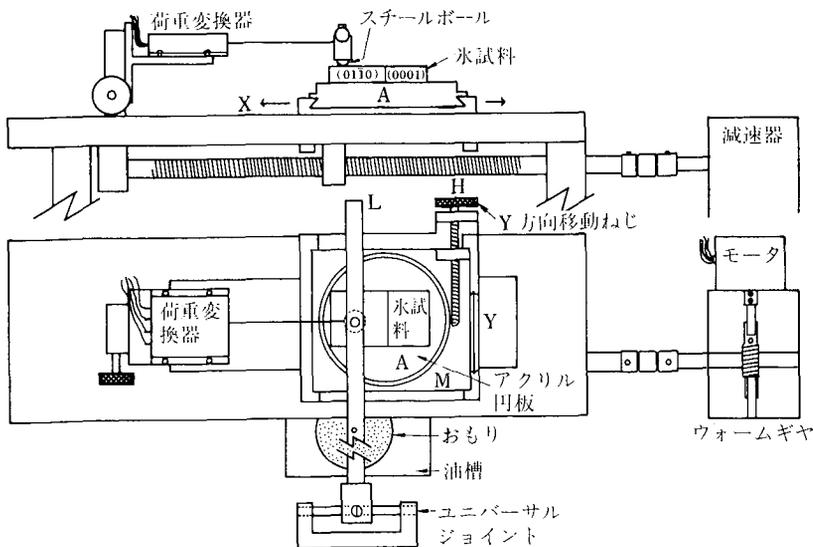
本研究は剛体球と水平板間の最も単純化された摩擦を行うことにより、氷の摩擦特性を明らかにすること、および凝着説が実際の氷の摩擦に適用できるかどうかを検討する目的で行った。

従来の平板同士の摩擦では、真実接触面積の測定が難しく、接触面の真の圧力に関しては推測の範囲を出なかった。このことはまた摩擦機構の議論に大きな混乱とあいまいさをもたらす原因でもあった。そのようなあいまいさを避けて摩擦機構の議論を進めてゆくためには、真実接触面積と真実接触面の形状を知ることが必要不可欠である。これらの条件をみたすものとして、本研究では鋼球と水平板間の摩擦を選んだ。この場合、接触面は1カ所しかなく、見かけの接触面を真実接触面と見なすことができ、しかもこの接触面は幾何学的な球面と見なしてよい。この方式の摩擦では、溝掘り抵抗が余分に加わるのであるが、結果的には溝掘り抵抗がかなりあるにもかかわらず、氷は十分小さい摩擦を示すのであって、本論で議論する氷の低摩擦機構の解明に支障をもたらすとは考えられない。

II. 実験装置

第1図に装置を示した。アクリル円板 A に凍着された平板状氷試料の上に、金属棒 L に固定された鋼鉄球の滑走体がついている。棒 L の一端はユニバーサル・ジョイントに接続されている。ジョイントの垂直軸には摩擦を小さくする目的でピボット軸受を用いた。棒 L の中間にいろいろな重さのおもりをつるすことにより、接触面の荷重を 44 g から 3100 g まで変えた。

モータを回転させると試料載物台 M は矢印 X の方向に一定速度で動く。このとき、氷が鋼球に及ぼす摩擦力を荷重変換器 (共和の U ゲージ CT-500) で測定した。



第1図 実験装置

氷試料の凍着されたアクリル円板 A は真鍮の筒にはめ込まれているので、筒内で任意の方向に回転できる。またハンドル H によって試料載物台を X に直角な Y 方向へ移動できる。各測定が終る毎に H を動かし、常に新しい氷の面の摩擦を行った。同期モータと減速器（ウォーム歯車）とをいろいろに組み合わせるにより、摩擦速度を 0.74 cm/s から 1.5×10^{-5} cm/s の広範囲にわたって変えた。

おもりを棒 L につると、おもりが振動し摩擦変動の原因となることがあった。そのような場合は、おもりの振動を止める目的で、おもりを適宜エチレングリコールに浸した。この際、エチレングリコールが蒸発して氷の表面を汚染する危険があったため、表面にシリコンオイルを薄く浮かべて、液の蒸発を防止した。

装置全体が木製の実験台ののっでいて、温度を自由に制御できる低温実験室におかれている。実験は -0.5°C から -30°C の間の温度で行った。温度制御は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内の精度で行われた。

一般に静摩擦の測定において、測定前に微細な振動を与えると静摩擦の減少することが知られている。これは摩擦材間に形成される凝着部の一部が微細な振動によって破壊されるためである。このような外的要因による摩擦の変動をさけるため、コンクリートの床と実験台の脚との間に 5 mm 角のゴム板を入れ、また実験台の棚にも鉄のおもりを入れて台の慣性を大きくし、床を伝わる微細な振動が直接装置に加わるのを防いだ。

Niven²⁾、小林³⁾らは 0.006~0.003 という小さな動摩擦係数をえている。これらの値から推定すると、表面に 0.2 度の傾きがあると一度動いた滑走体は力を加えずに、どこまでも動いてしまうことになる。したがって、摩擦力の正しい測定を行い、摩擦機構の議論を進めるためには、移動する試料面の傾斜を少なくとも 0.02 度以内まで水平に保つ必要がある。本装置ではこの点に特別の注意を払い、精密水準器によって試料載物台の傾きを 4×10^{-4} 度以内とした。この程度の傾きでは摩擦力の測定に全く影響が現われない。

III. 試料

1. 氷

実験には氷河の巨大単結晶を用いた。この氷から次の方法で底面 (0001) および柱面 (01 $\bar{1}$ 0) を摩擦面とする双結晶の氷試料を作った。

まず単結晶氷に赤外線照射してチンダル像を作る。チンダル像は (0001) 面に発生する³³⁾ことが知られているので、この像に平行に切ると氷の (0001) 面が現われる。次にこの面に二塩化エチレンのフォルムバール溶液で蝕像を作り³⁴⁾ (六角形のピットができる)、ピットの一つの稜に平行でかつ (0001) 面に垂直な面を切り出すと、(01 $\bar{1}$ 0) 面が得られる。各側面にも蝕像を作り、それぞれ底面および柱面が正確に摩擦面となるように補正した。次にこの氷を側面で接合させた双結晶をアクリルの円板 A に凍着させた。このようにして底面および柱面を摩擦面とする試料が得られた。

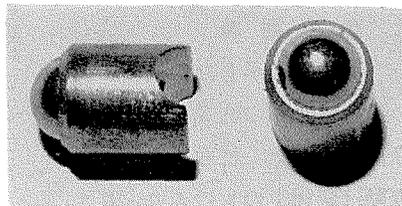
試料を -3°C に半日ほど焼鈍した後、表面を旋盤で削った。旋盤で削る際、氷の温度が低すぎると仕上げ面がガラガラし、こまかいキズを生じさせることが多い。しかし、 -5°C 以上

の高い温度で削ると、削りキズも小さく、削り粉が長い帯状となるため、氷表面への削り粉の付着もなく、光沢のある面が得られた。この試料を -3°C で2時間ほど焼鈍すると、切削によって生じた微細な突起が昇華等により消失し、表面が鏡面状になった。この試料を実験温度に5時間以上おいてから実験を始めた。

表面に付着した削り粉を刷毛などにより不用意に除去すると、その後の焼鈍過程で大きなキズに成長する。表面に付着した削り粉はブロワーで吹き飛ばして除去した。また、高温での焼鈍時間が長すぎると、その後試料を実験温度に移した際に表面にくもりを生じさせる原因となった。このような試料では摩擦抵抗の変動が大きくデータとして使用できない。

2. 鋼鉄球

滑走体として使用した鋼鉄球は直径 1.6 mm から 12.7 mm のものであるが、主に直径 6.4 mm のものを使用した。鋼鉄球は第2図に示すように、真鍮の試料受けにはめ込まれている。この鋼鉄球をアルコール、アセトンの各溶液を用いて超音波洗浄器内でよく洗い、さらに蒸留水中でくり返し洗浄後赤外線ランプで乾燥させて実験に用いた。



第2図 滑走体
直径 6.4 mm の鋼鉄球が真鍮の取付台にはめ込まれている

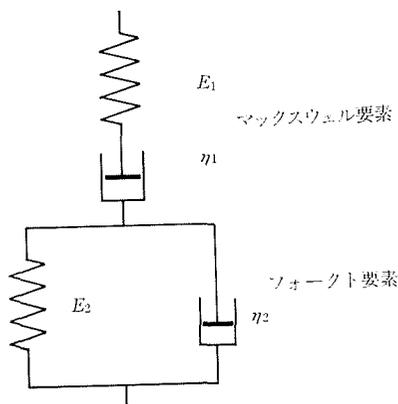
IV. 結果

氷は典型的な粘弾性体である。それゆえ、氷に一定荷重を加えても真実接触面積は接触時間の大小によって異った値をとる。

単結晶氷の粘弾性は第3図に示した4要素模型によって表わされる (Glen³⁵, 若浜³⁶)。ヤング率 E_1 , E_2 および粘性係数 η_1 , η_2 は温度に強く依存し (Jellinek and Brill³⁷)、氷の結晶方位によっても多少異なる (Bass³⁸) ことが知られている。これらの諸特性は摩擦の際の真実接触面積や剪断、掘り起し抵抗に大きな影響をおよぼすことになる。それゆえ、氷の摩擦は温度、速度、結晶面および荷重に依存することが考えられる。例えば、高速度の摩擦では主に E_1 による弾性的挙動を示すであろうし、また極端な低速の摩擦ではマックスウェル要素の粘性項 η_1 が大きな働きをして、鋼鉄球の氷へのめり込みが著しくなり、剪断抵抗や掘り起し抵抗の増大をもたらすであろう。

ブリネルかたさが剪断強度の100倍も大きい氷では溝掘り抵抗が剪断抵抗と同程度又はそれ以上に大きくなり、Amontonの摩擦の法則も成り立たなくなることが予想される。

一方、氷に溝掘りのような大きな変形が加えられると、再結晶やクラックなどが発生する。そして、これらの変形に摩擦エネルギーが消費される結果摩擦が



第3図 氷の粘弾性模型

増大する。溝掘りの度合や再結晶，クラックなどの変形は荷重，速度，温度，氷の結晶面，滑り方位その他に依存する。

以下，荷重，速度，温度の摩擦におよぼす影響を述べる。滑走材の寸法効果，各種結晶面および滑り方位による摩擦の異方性については本研究 II³⁹⁾，III⁴⁰⁾ で述べる。滑走材の材質の効果および氷球と金属板，プラスチック板との摩擦については本研究 IV 以降で述べる予定である。

1. 摩擦曲線

第4図に示したように柱面上の摩擦は底面の約2倍の大きさの摩擦を示した。柱面上の摩擦力の変動は底面上のものより大きく，結晶粒界で急激に減少した。

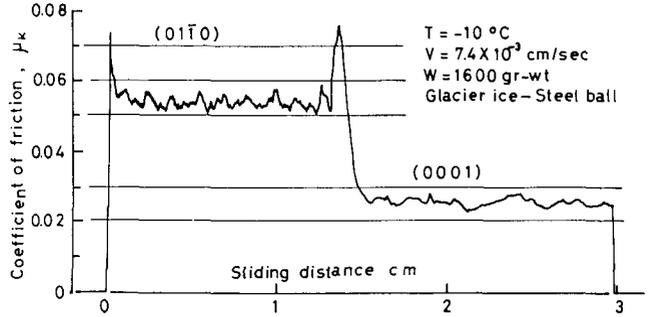
摩擦曲線の変動は殆どどの条件下で観察されたが，本研究 III⁴⁰⁾ で述べるように，適当な条件下で摩擦曲線の変動が完全に消失すること，および削り粉の発生や摩擦痕幅の不均一が変動を増大させることから，ここにあらわれた曲線の変動は摩擦現象に由来するものと考えて差し支えないであろう。

2. 荷重効果

第5図に摩擦速度 7.4×10^{-3} cm/s，温度 -10°C で荷重を 44 g から 3100 g まで変えたときの動摩擦係数 μ_k の値，および接触面積 A と荷重 W との比，掘り起し断面積 A^* と W との比を示した。

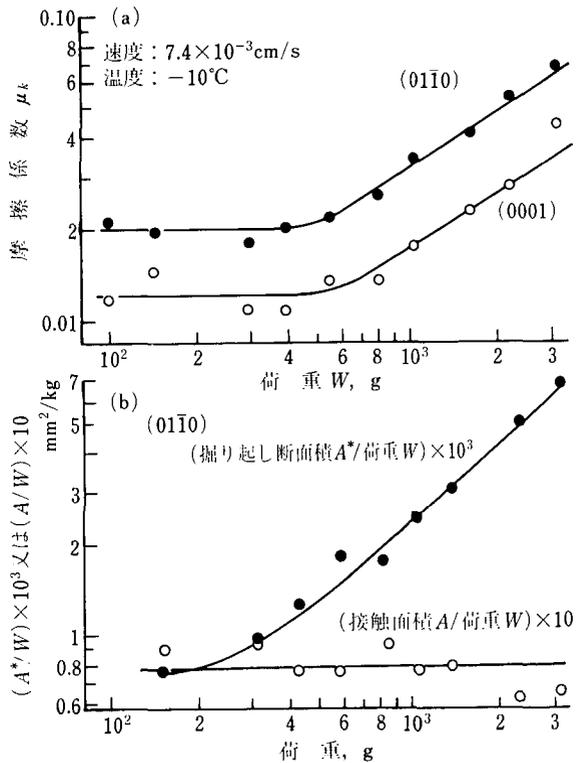
μ_k は荷重の小さい領域では一定値を示し，荷重の大きい領域では荷重の増大とともに増加した。そして柱面上の μ_k は底面上の値より2倍近く大きくなっている。

第5図bから， A/W は全荷重にわたってほぼ一定値を示しているが， A^*/W は荷重の増加につれて著しく増



第4図 摩擦曲線

荷重：1600 g，速度： 7.4×10^{-3} cm/s，温度： -10°C ，
 曲線の左半分は(0110)面，右半分は(0001)面



第5図 荷重効果

上図は μ_k と荷重の関係 (白丸：底面，黒丸：柱面) を，
 下図は摩擦係数の剪断項 (白丸) と掘り起し項 (黒丸) の
 荷重効果を示す

大するのがわかる。それゆえ、荷重の大きい領域での μ_k の増大は掘り起し項の増大によると考えられる。

摩擦速度が小さくなると、第8図に示すように、 μ_k 一定の領域が減少する。これは低速になるほど氷のクリープが顕著になり、掘り起し項の摩擦に占める割合が大きくなるためである。

金属間の摩擦では μ_k は一般に非常な広範囲の荷重に対して一定値を示す (Whitehead⁴¹⁾, Bowden and Tabor⁴²⁾) のであるが、氷では Arnold-Arabief⁴³⁾, Niven⁴⁴⁾ 等の指摘するように μ_k は荷重に依存し、Amonton の摩擦の法則は当てはまらない。

3. 速度効果

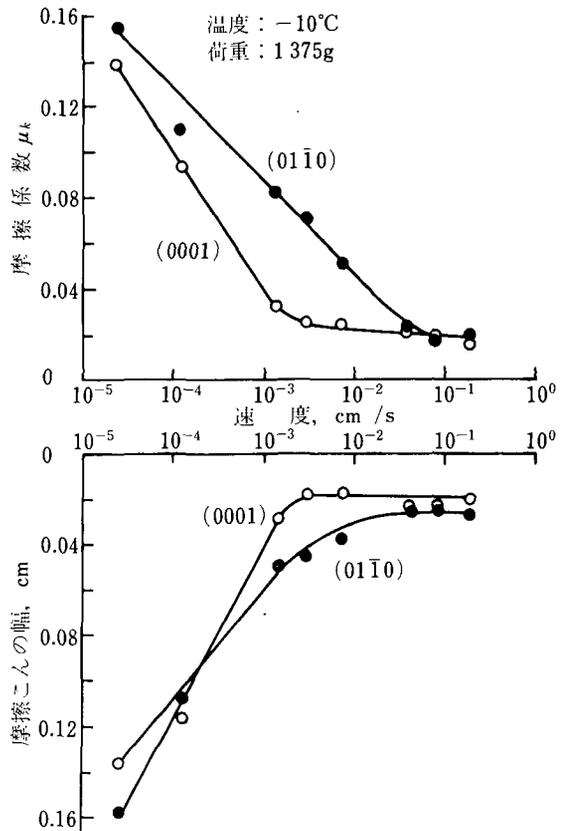
氷は粘弾性体なので、一定の荷重を加えても、高速では摩擦痕の幅は狭く、低速になるほどクリープによる溝幅の増大のため摩擦が大きくなるであろう。これらの点を明らかにするため、温度、荷重を一定にして速度を変えたときの摩擦を調べた。荷重を 1375 g、温度を -10°C とし、速度を 0.18 cm/s から $1.5 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ まで変えたときの μ_k と摩擦痕幅 ϕ の測定結果を第6図に示した。

μ_k は速度が小さいほど大きな値を示したが、ある速度以上では速度に無関係にほぼ一定値となった。この μ_k 曲線はまた同図に示した摩擦痕幅の測定値 (ϕ 曲線) と非常によく相関を示している。つまり、 ϕ 一定の領域は μ_k 一定の領域であり、 ϕ の増大に対応して μ_k も増大している。

氷のすべり面は (0001) 面であるから、(0001) および (01 $\bar{1}$ 0) 面は垂直力に対しては最も変形しにくい面である。しかし、氷に大きな変形が加えられると、これらの面に再結晶やクラックが誘発されクリープが生じやすくなる。再結晶やクラックの発生は荷重、速度、温度等の摩擦条件に依存するが、同一条件下では再結晶発生の速度は (01 $\bar{1}$ 0) 面よりも (0001) 面の方が小さかった。このため、(0001) 面上では μ_k 一定の速度領域が (01 $\bar{1}$ 0) 面のものより低速度まで広がっているものと考えられる。

4. 温度効果

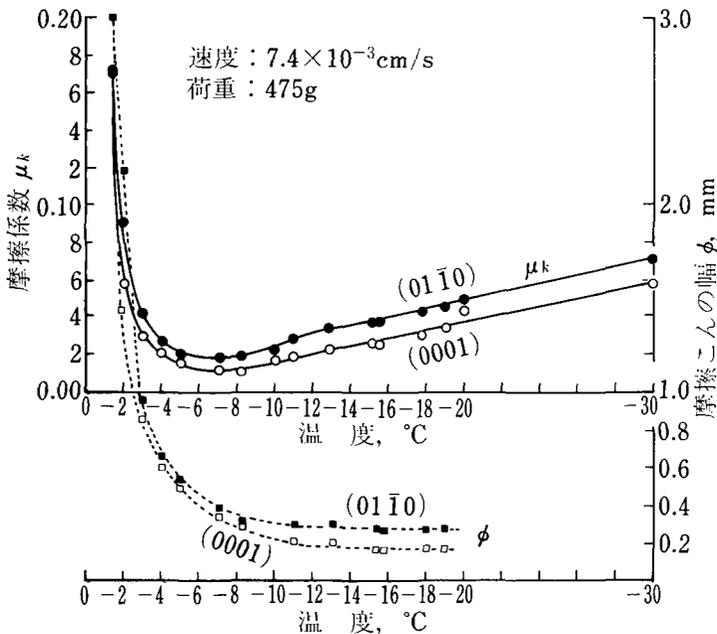
流体潤滑説の根拠の一つに、温度低下にともなう摩擦の増大があげられてきた。温度が低くなると圧力や摩擦熱によ



第6図 摩擦係数および摩擦痕幅におよぼす速度の影響

る氷の融解が生じにくくなるため摩擦が増大すると考えたのである (Reynolds⁸⁾, Bowden and Hughes¹⁾), しかし, この温度特性は特定の摩擦機構を支持することにはつながらない。温度低下による摩擦の増大は流体潤滑説のみならず, 水蒸気潤滑説や凝着説およびその他の説によっても定性的説明は可能だからである。例えば, Jellinek⁴⁵⁾ および Raraty and Tabor⁴⁶⁾ らの付着実験で示されるように, 温度低下は界面剪断強度の増大をもたらし, 摩擦の温度依存は凝着説や liquid like layer 説⁴⁷⁾ によっても定性的説明はできるからである。

第7図に荷重と速度を一定にして, 温度を低いほうから高いほうへ変えていったときの摩擦係数および摩擦痕幅の測定結果を示した。



第7図 摩擦係数と摩擦痕幅におよぼす温度の影響

(0001) 面および (01 $\bar{1}$ 0) 面のどちらの場合も, μ_k は -7°C 付近に極小値をもち, これより高い温度でもまた低い温度でも μ_k は増大した。

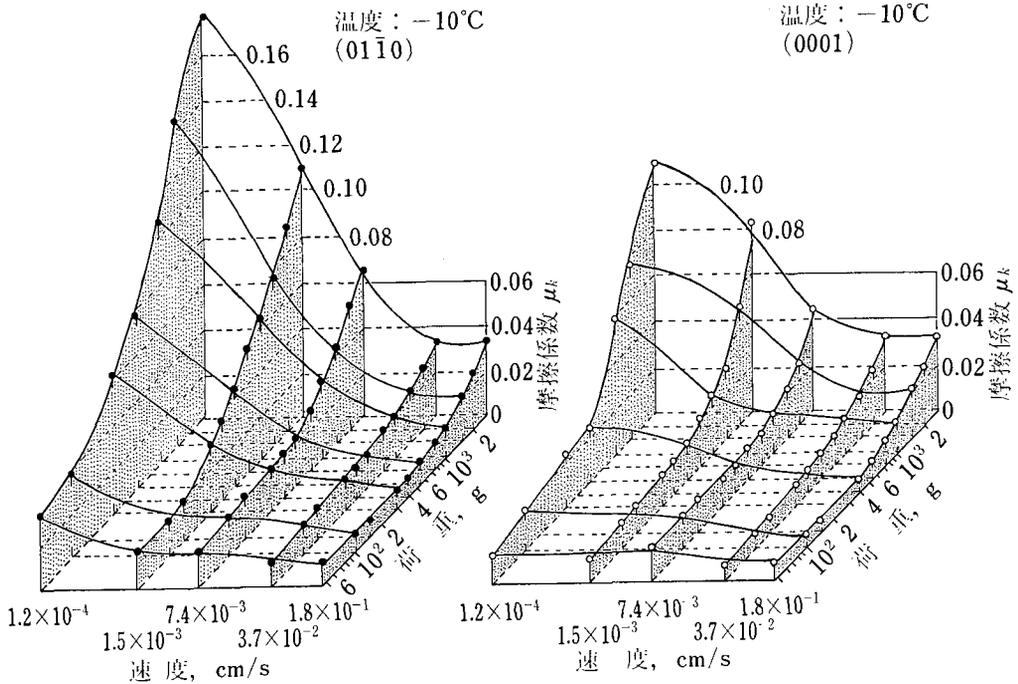
摩擦痕は温度の低いほど幅が狭く再結晶の発生も少なかったが, -7°C 以上では溝幅が急速に拡大した。

したがって, 溝幅の急速な増大が主に -7°C 以上での摩擦の増大をもたらしたと考えてよいであろう。しかし, -7°C 以下の温度では溝幅にはほとんど変化がないので, 接触面積だけからは μ_k の増大を説明できない。この温度領域での摩擦の増大はすでに述べた付着実験あるいは対馬・藤井⁴⁸⁾ の氷の剪断強度の温度低下による増大によって説明される。

μ_k 極小を与える温度は高速になると低温側へ, そして低速になると高温側へ移動した。例えば, (01 $\bar{1}$ 0) 面の場合, 速度 $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ のときの μ_k 極小を与える温度はそれぞれ -4°C , -2.7°C であった。

5. μ_k - V - W 図表

以上の結果から、氷の摩擦は速度、荷重、温度および結晶面等に依存することがわかった。これら全ての関係の一つの図表上に表現することは困難であるが、一つの試みとして、温度を一定にして荷重 W と速度 V を変えたときの μ_k の変化を第 8 図に示した。



第 8 図 μ_k - V - W 図表

左図: 柱面 (0110), 右図: 底面 (0001)

μ_k は 0.005 から 0.16 までの広い範囲にわたって分布しているが、最大の μ_k をとっても金属間摩擦 ($\mu \approx 0.5$) に比べると非常に小さい。図からわかるように、 μ_k は荷重が小さく速度の速いほど小さく、逆に荷重が大きく速度の遅いほど μ_k が大きくなった。そして、全ての条件下で (0001) の面は (0110) の面より摩擦が小さかった。このことは、氷の (0001) の面は垂直力に対しては最もかたい面であるが、剪断力に対しては最も弱い面である (氷の結晶学的すべり面は (0001)) ことによっても理解できるであろう。

第 8 図の μ_k 曲面で、 μ_k の小さい領域は摩擦痕上に再結晶やクラック発生の少い領域であり、 μ_k の大きい領域は再結晶やクラックが顕著に発生する領域に対応していた。

6. 摩擦痕幅の測定

摩擦機構を解明してゆく上で摩擦痕の観察は不可欠であるが、摩擦痕幅 ϕ の測定は凝着説の剪断抵抗や掘り起し抵抗を決定する上で必要不可欠である。

ϕ は荷重、速度、温度、結晶面などによって異なるのであって、第 2 表では温度 (-10°C) と速度 (7.4×10^{-3} cm/s) を一定にして、荷重を変えたときの ϕ の変化および接触面積、接触面の平均圧力、掘り起し断面積を示した。

第2表 摩擦の諸特性

 $T = -10^{\circ}\text{C}$, $V = 7.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 氷河水 (01 $\bar{1}0$), $k = 0.8$

| 荷重 (g) | 摩擦係数 (μ_k) | 摩擦痕幅 (ϕ , mm) | 接触面積 (A , mm ²) | 平均圧力 (kg/mm ²) | 掘り起こし面積 (A^* , mm ²) |
|-----------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|
| 144 | 0.020 | 0.16 | 0.016 | 9.0 | 0.00011 |
| 295 | 0.018 | 0.22 | 0.030 | 9.7 | 0.00028 |
| 395 | 0.021 | 0.29 | 0.053 | 7.5 | 0.00064 |
| 545 | 0.022 | 0.34 | 0.073 | 7.5 | 0.0010 |
| 795 | 0.026 | 0.37 | 0.085 | 9.2 | 0.0013 |
| 1045 | 0.036 | 0.47 | 0.139 | 7.5 | 0.0027 |
| 1600 | 0.043 | 0.58 | 0.211 | 7.9 | 0.0051 |
| 2500 | 0.057 | 0.75 | 0.353 | 6.2 | 0.011 |
| 3100 | 0.070 | 0.88 | 0.487 | 6.4 | 0.018 |

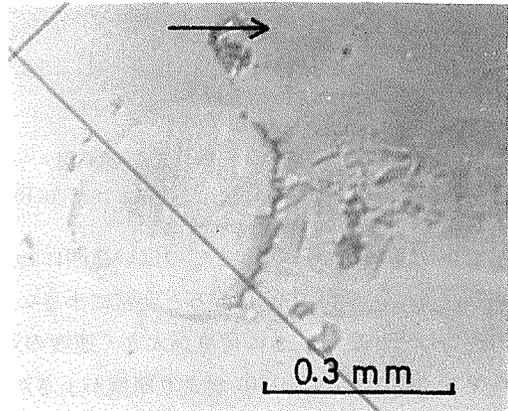
接触面積 A は摩擦痕幅を ϕ として,

$$A = \pi(\phi/2)^2 k \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 k は接触面の形状因子で、円形から真の接触面のずれの度合を示し、 $0.5 \leq k \leq 1$ の範囲にある。この k の値は接触面の形状を直接観察することによって定めることができるが、本装置の鋼球滑走体では接触面の直接観察ができなかった。それで鋼球と同じ直径 6.4 mm のガラス半球と氷との摩擦面を写真にとることによって k の値を定めた。第9図に摩擦面の写真を示した。シリコンオイルを塗った氷表面 (01 $\bar{1}0$) 上にガラス半球を滑らせ、下面から写真用のフラッシュを照射して顕微鏡写真をとった。滑走体前面はほぼ円形に近いが、後面は円形から大きくずれている。第9図から、 k を 0.8 として第2表の計算を行った。この k の値は続報 II で述べるように、結晶面によって異なり、(0001) 面では 1 に近い。第2表から接触面の平均圧力は 7.5 kg/mm^2 内外であり、この圧力による融点降下は 5.5°C である。また、あとで議論するように摩擦熱による温度上昇は 0.3°C 以内となるので、融解水の介在はないと考えられる。

7. 滑走体の寸法効果

荷重、温度、速度などが同一の摩擦条件にあっても、滑走体の大きさによって μ_k は異なる。滑走体の直径を小さくすると掘り起こし面積の増大することが μ_k の変化する原因の一つとなっているであろう。



第9図 ガラス半球と氷(01 $\bar{1}0$)の摩擦面
氷の表面にシリコンオイルが塗ってある。氷が矢印の方向に動く。 $T = -10^{\circ}\text{C}$, $V = 7.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, $W = 475 \text{ g}$

第10図 aには、荷重を475g、速度を 7.4×10^{-3} cm/sとして、滑走体の直径 R を1.6 mmから12.7 mmまで変えたときの μ_k を示した。 μ_k は R の増大とともに、急速に減少し、 R が9.5 mm以上ではほぼ一定値となった。

(01 $\bar{1}$ 0)面についてみると、摩擦痕の幅は R に関係なくほぼ0.33 mmであった。

$R \geq 9.5$ mmにおける μ_k 一定の領域を純粹剪断の摩擦と見なして、界面剪断強度 s を計算すると、

$$s = 0.07 \text{ kg/mm}^2 \quad (2)$$

となる。

次に μ_k を R の逆数に対してプロットすると、第10図 bに示すように直線関係となることがわかった。この関係は α を定数として次式で表わすことができる。

$$\mu_R - \mu_{12.7} = \alpha/R \quad (3)$$

ただし、 μ_R は直径 R の滑走体の動摩擦係数である。 $\mu_{12.7}$ が純粹剪断に近い μ_k を与えると考えると、(3)式の左辺は直径 R の滑走体の掘り起しによる動摩擦係数を与えることになる。

(01 $\bar{1}$ 0)について、実際の値を代入すると掘り起し強度 p は、

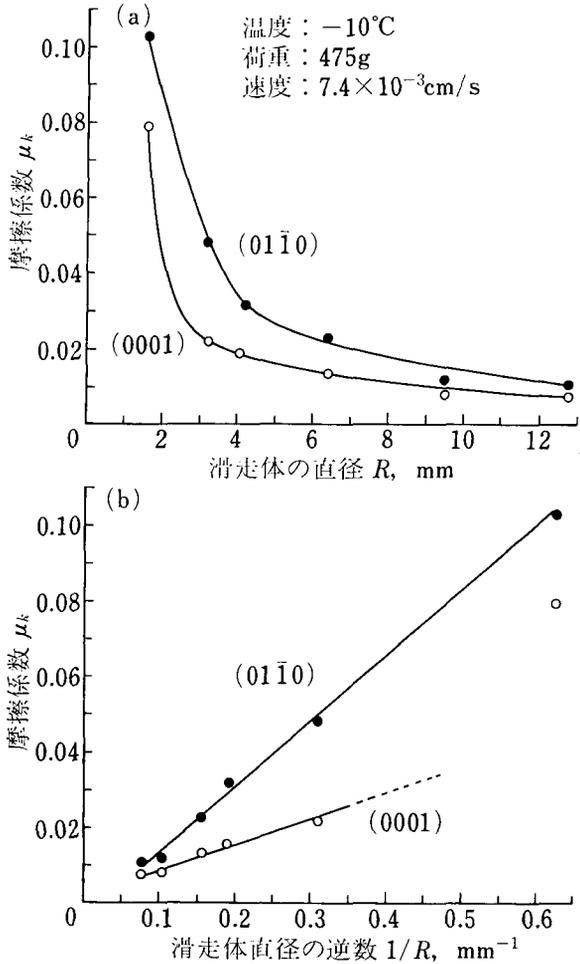
$$p = 10 \text{ kg/mm}^2 \quad (4)$$

と計算される。

8. 摩擦痕の観察

氷の摩擦機構を解明する上で、摩擦痕の観察が不可欠であることはすでに述べた。摩擦痕の幅は速度、荷重、温度によって異なるが、摩擦痕内およびその付近には再結晶やクラック、すべり線、小傾角粒界等の観察されることがある。

第11図に代表的な摩擦痕の写真を示した。荷重の小さい場合には、摩擦痕は単純な溝(写真 a)であるが、荷重が増すとまず柱面上に再結晶が現われ(写真 b)、続いて再結晶とクラック(写真 c)が発生し、底面にも再結晶(写真 d)が現われた。底面にクラック(写真 e)を発生させるためにはさらに荷重を増す必要があった。このような再結晶やクラックは -5°C 以上の高温部を除くと、温度の高いほど、また速度の遅いほど発生しやすかった。再結晶粒の大きさ



第10図 滑走体の寸法効果

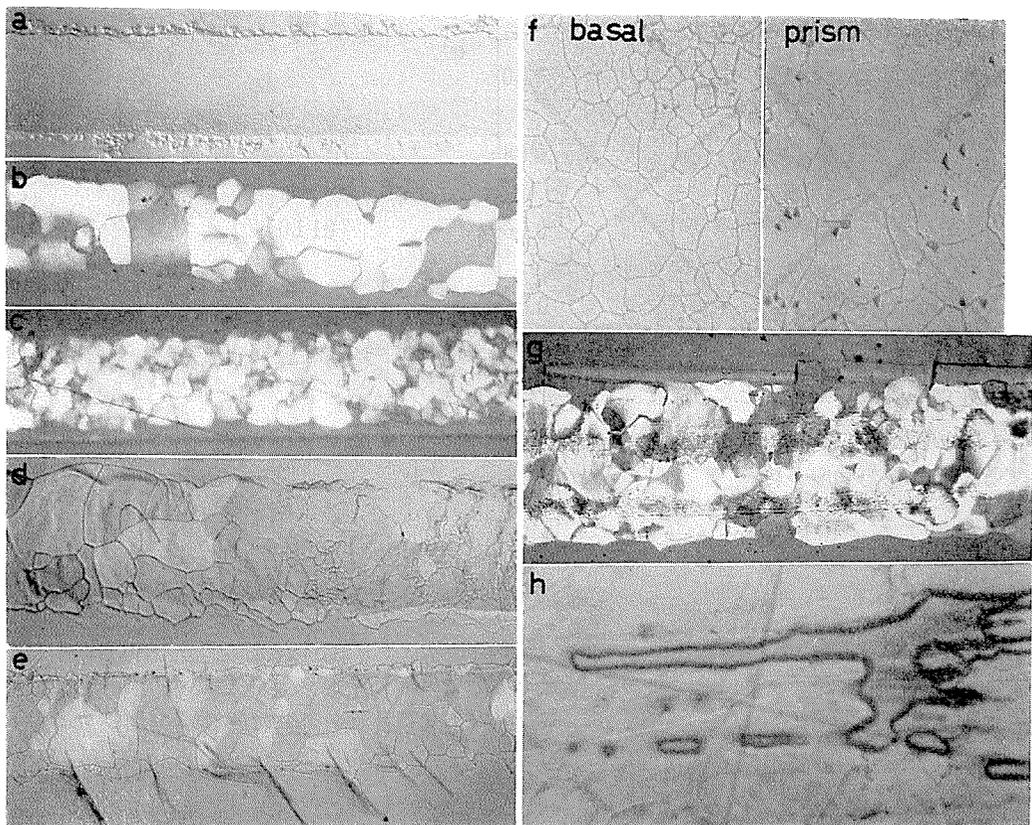
上図 a の μ_k を直径 R の逆数に対してプロットしたのが下図 b

は写真 f に見られるように柱面上に発生するものの方が底面上に発生するものより大きかった。例えば、写真 f で柱面上の再結晶粒の平均の大きさは $1.7 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ であり、底面上の $4.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ に比べ 4 倍近く大きい。これらの再結晶粒の大きさは荷重や速度によって変わるが、概して柱面上のものが底面のものより大きい粒径をもっていた。クラックについては結晶面特有の規則性があり、柱面上の摩擦では底面 (0001) 内にクラックが発生し、底面上の摩擦では柱面 (01 $\bar{1}$ 0) にクラックが発生した。

表面に見える再結晶粒の大きさと同程度の深さまで再結晶が及んでいると仮定すると、柱面上ではより深い層まで激しい変形がおよんでいることを示すもので、柱面上でクラックの発生しやすいことも含めて柱面上の摩擦を大きくする原因の一つをなしているものと思われる。

第 11 図 c に見られるクラックは結晶内部に発生しているもので、いわゆる劈開クラックである。これとは別に速度と荷重が大きい場合には貝殻状の脆性クラックが発生した。

柱面上では写真 g に見られるすべり線や小傾角境界がしばしば観察された。すべり線や小傾角境界の発生は底面上では認めることができなかった。



第 11 図 摩擦痕の写真

a: 荷重小, b: 柱面上の再結晶, 荷重中, c: 柱面上の再結晶とクラック, 荷重大, d: 底面上の再結晶, 荷重中, e: 底面上の再結晶とクラック, 荷重大, f: (左) 底面と (右) 柱面の再結晶, g: 柱面上の小傾角境界とクラック, 再結晶, 以上 -10°C , h: 摩擦痕上に現われたひも状模様, -30°C

上記の摩擦痕の観察中、ごくまれに写真 h のような融解再凍結の痕跡と思われる長いひも状の様子が観察された。このひも状のものは滑走方向に数ケの再結晶粒にまたがってのびていた。この模様は -10°C から -30°C の温度で観察されたが、最も融解の可能性の高い -5°C では認めることができなかった。写真のひも状に見える部分が融解・再凍結によるものとする、圧力融解によって生じたとしなければならない。この圧力融解については議論の項で詳しく述べる。摩擦痕周辺に発生するすべり線については統報 III で述べる。

V. 議 論

以上の結果から、氷の摩擦は荷重、速度、温度および結晶面に依存することがわかった。荷重や速度による動摩擦係数 μ_k の変化は掘り起しおよびクリープと深い関係があった。温度による μ_k の変化はクリープおよび界面剪断強度の温度依存によって説明された。

結晶面による摩擦の違いは、氷のかたさが結晶面によって異なる (Butkovich²⁹), 北原ら⁴⁹) こと、および (0001) が氷のすべり面であることに主として関係しているであろうが、再結晶発生の度合いが結晶面によって異なることも関係しているであろう。再結晶が摩擦に深い関係をもつと思われる例として、速度 1.2×10^{-4} cm/s, 荷重 545 g で実験中、底面上で一定値を持続していた摩擦が、急にそれまでの半分程度の値まで減少することがごく稀にあった。摩擦痕を調べると、始め摩擦痕一杯に広がっていた再結晶が、摩擦減少の起った領域では完全に消失していた。

測定された氷の μ_k は非常に小さいのであるが、これまでに述べた摩擦特性を説明するのに特に水の存在を仮定する必要はなかった。次に凝着説の立場から結果の議論を進めよう。

1. 凝着説による結果の検討

ここでは、第 5 図の荷重効果に凝着説を適用してみよう。この場合、第 2 表からわかるように圧力による融解は生じないと考えてよい。一方、摩擦熱による温度上昇 ΔT は、摩擦速度の小さい場合、

$$\Delta T = \frac{\mu WV}{4aJ} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (5)$$

によって与えられる (Jaeger⁵⁰) または佐藤⁵¹)。ただし a は真実接触面の半径、 W は荷重、 V は摩擦速度、 k_1, k_2 は氷および滑走体の熱伝導率、 μ は摩擦係数、 J は熱の仕事当量である。

温度上昇 ΔT は、 μ_k, W, V に比例し、接触面の半径に反比例する。今、最大の ΔT を見積るために、 μ_k, W, V としてそれぞれ本実験の最大値に近い値を使って計算してみよう。一例として、 $\mu_k = 0.2, W = 3100$ g, $V = 0.18$ cm/s, $a = 0.05$ cm, $J = 4.2 \times 10^7$ erg/cal, $k_1 = 0.5 \times 10^{-2}$, $k_2 = 47.6 \times 10^{-3}$ cal/s·cm·deg を用いると、

$$\Delta T = 0.3^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

となる。

実際の μ_k, W, V はこの計算に用いた値より小さいのが常であるから、 ΔT はここで求めた値よりさらに小さくなり、事実上摩擦熱による温度上昇は無視して差しつかえない。したがって、圧力による融点降下を考慮しても -10°C 以下の低い温度では融解の可能性はなく、純

氷の境界摩擦になっていると考えてよい。

金属およびプラスチックなどの境界摩擦は凝着説によって説明されている。この説を鋼球—氷平板の摩擦に適用しよう。そのためには、通常の剪断抵抗 F_s の他に掘り起し抵抗 F_p および再結晶やクラックその他の氷の変形を生じさせるための抵抗 F_d を考慮する必要がある。つまり、摩擦抵抗 F は、

$$F = F_s + F_p + F_d \quad (7)$$

となる。掘り起し変形によって、再結晶やクラックが発生すると仮定すると、 $F_p + F_d$ を F_p とおくことができる。摩擦痕幅を ϕ 、剪断強度を s 、掘り起し強度を p 、滑走体の直径を R とすると、

$$\left. \begin{aligned} F_s &= (1/4) \pi k \phi^2 s \\ F_p &= (\phi^3 / 6R) p \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と表わされる。剪断項および掘り起し項の動摩擦係数 μ_k への寄与を μ_s 、 μ_p とすると、

$$\mu_s = F_s / W, \quad \mu_p = F_p / W \quad (9)$$

となる。 s 、 p の値として (2)、(4) 式の値を用い、第 4 図および第 2 表の測定値をもとに μ_s 、 μ_p の値を計算すると第 3 表が得られる。

第 3 表 凝着説による摩擦係数の計算

$T = -10^\circ\text{C}$, $V = 7.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 氷河氷 (0110), $s = 0.07 \text{ kg/mm}^2$, $p = 10 \text{ kg/mm}^2$

| 荷重 (W , g) | 摩擦係数 (μ_k) | 剪断項 (μ_s) | 掘り起し項 (μ_p) | 計算と実測値の比 ($\mu_s + \mu_p$)/ μ_k |
|------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--|
| 144 | 0.020 | 0.008 | 0.008 | 0.8 |
| 295 | 0.018 | 0.007 | 0.010 | 0.9 |
| 395 | 0.021 | 0.009 | 0.016 | 1.2 |
| 545 | 0.022 | 0.009 | 0.018 | 1.2 |
| 795 | 0.026 | 0.007 | 0.016 | 0.9 |
| 1045 | 0.036 | 0.009 | 0.027 | 1.0 |
| 1600 | 0.043 | 0.009 | 0.032 | 1.0 |
| 2200 | 0.057 | 0.011 | 0.050 | 1.1 |
| 3100 | 0.070 | 0.011 | 0.059 | 1.0 |

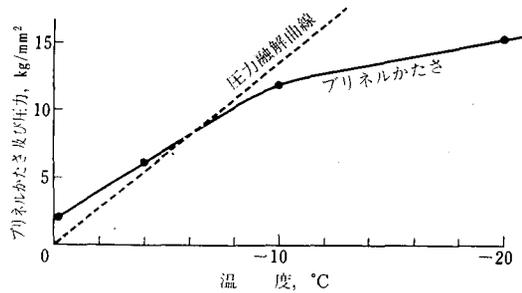
μ_s は全荷重にわたって 0.009 のほぼ一定値を示しているが、 μ_p は荷重 144 g の 0.008 から、荷重が増すとともに大きくなって、3100 g では 0.059 と 7 倍も大きくなった。この第 3 表の結果はまた IV・2 で述べた荷重の増加による μ_k の増大が掘り起し項によることをも裏付けている。計算で求めた摩擦係数 ($\mu_s + \mu_p$) と実測の μ_{exp} との比は 0.8~1.2 の間にあり殆んど 1 である。このことは、速度が 0.18 cm/s 以下で測定された氷の異常に小さい摩擦もまた金属間の摩擦と同様凝着説によって説明できることを示すものであろう。金属と異なる点は、氷の塑性流動圧力 (ブリネルかたさ) は金属にくらべ、それ程小さくはないのに、剪断強度が金属にくらべ極端に小さいことである (第 1 表参照)。これが、氷の摩擦が異常に小さい原因であると考えられる。氷の摩擦面には当然のことながら吸着物質などの薄膜の存在が予想されるが、摩擦

から求めた剪断強度と氷の剪断強度には大差が認められないことから、氷の低摩擦を説明するのに、氷の表面に軟質表面膜等の特殊の表面膜を導入する必要はないであろう。

第2表で掘り起し項の全摩擦に占める割合が非常に大きいにもかかわらず、 μ_k は氷の高速摩擦で得られている値と同程度に小さいことは注目してよいであろう。また氷の p は s の100倍ほど大きい(金属では $p \approx 2s$)、そのため金属間摩擦では無視される掘り起し項 μ_p が氷では無視できなくなり、Amontonの摩擦の法則が当てはまらなくなるばかりでなく、 μ_p が氷の摩擦の支配的役割を果たすようになる。

2. 圧力融解について

Joly⁷⁾ や Bowden ら¹⁾ が氷の摩擦説を出した頃は氷のかたさに関する信頼度の高い測定もなく、真実接触面積したがって接触面の圧力の大きさは推定の域を出なかった。氷のかたさに関するやや信頼のおける測定が行われるようになったのはようやく1950年代に入ってからである。第12図には Butkovich²⁹⁾ の測定による氷のブリネルかたさの温度特性とその温度で圧力融解を生ずべき圧力を示した。氷のような粘弾性体ではかたさの値はかたさ計を氷に押し込んでいる時間によって著しく変る。それで第12図には便宜上かたさ計を押し込んでから1秒後の値を示した。図からわかるように -6°C より高い温度では氷のかたさが圧力融解の圧力を越えているので、 -6°C 以上では塑性変形で真実接触面が増える前に圧力融解が起ってしまう。しかし、 -6°C 以下では圧力融解の起る前に塑性変形で接触面積が増え有効圧力は下り圧力融解は起こりにくい。ところで、実際のスケートの滑走で、氷の一点がスケートに接している時間は1秒よりはるかに短い。したがって、もしそのような短い加圧時間で氷のかたさを測定すると第12図の実線とはかなり違うことが予想される。それゆえ第12図の実線と点線の交点は -6°C より低温側にずれるであろう。それはともかく、この図は氷が塑性変形しやすいので加圧しても真実接触面の拡大によって有効圧が減り必ずしも圧力融解は起らないことを示している。



第12図 氷のブリネルかたさと圧力融解曲線
単結晶氷(0001)面のかたさ(押込み1秒後の値, Butkovich²⁹⁾)と圧力融解曲線。 -0.25°C のかたさは Bowden and Tabor⁴²⁾ の著書による

次に熱的条件の検討をしよう。簡単のため氷体と同温度のスケートにだんだん圧力をかけ接触面での圧力がその温度での氷の平衡融解圧力に達したとしよう。ここで水の相が出現するのであるが水膜の厚さが増すためには圧力を増さねばならない。融けた水は接触面をはみ出して外側に出て凍る。ここで遊離された潜熱は主としてスケートを通して熱のシンクである接触面に輸送されるはずである(おもりのついた針金が氷を通り抜ける復氷現象における熱輸送に関しては Nye⁵²⁾ の理論的取扱いがある)。鉄製スケートの熱伝導率は氷より約100倍大きいので潜熱の輸送は殆んどスケートのほうから接触面に供給されると考えてよい。そこで大変単純化して、界面への熱輸送を半無限固体の熱伝導と見なすことにしよう。

次に熱的条件の検討をしよう。簡単のため氷体と同温度のスケートにだんだん圧力をかけ接触面での圧力がその温度での氷の平衡融解圧力に達したとしよう。ここで水の相が出現するのであるが水膜の厚さが増すためには圧力を増さねばならない。融けた水は接触面をはみ出して外側に出て凍る。ここで遊離された潜熱は主としてスケートを通して熱のシンクである接触面に輸送されるはずである(おもりのついた針金が氷を通り抜ける復氷現象における熱輸送に関しては Nye⁵²⁾ の理論的取扱いがある)。鉄製スケートの熱伝導率は氷より約100倍大きいので潜熱の輸送は殆んどスケートのほうから接触面に供給されると考えてよい。そこで大変単純化して、界面への熱輸送を半無限固体の熱伝導と見なすことにしよう。

始め均一温度 $T_0^\circ\text{C}$ にある半無限固体の表面温度を瞬間的に $T_s^\circ\text{C}$ (圧力による融点降下が $T_s^\circ\text{C}$) に変えたとき、表面での温度勾配は、表面に垂直に x 軸をとって、

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (T_0 - T_s) \eta \quad (10)$$

で与えられる (例えば, Ingersoll ら⁵³⁾)。ただし, $\eta = 1/2\sqrt{\alpha t}$, α は熱拡散係数, t は時間である。氷の一点が滑走中のスケートと接している時間を t_0 とすると, その間に界面 1 cm^2 に供給される熱 Q は、

$$Q = -\int_0^{t_0} k \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} dt = -2\sqrt{\frac{c\rho k}{\pi}} (T_0 - T_s) t_0^{3/2} \quad (11)$$

となる。ただし, c は比熱, ρ は密度, k は熱伝導率 (いずれも滑走材の値) である。各瞬間における真実接触面積の総和を A , 注目する真実接触面の一辺の長さを l , 荷重を W , スケートの速度を v とすると、

$$T_s = -0.0075 W/A, \quad t_0 = l/v \quad (12)$$

となる。したがって、融解水の厚さ d は、

$$d = Q/\rho_w L \quad (13)$$

となる。ただし, ρ_w は水の密度, L は氷の融解潜熱である。例えば, c, ρ, k に鉄の値を用い、始めの氷の温度 T_0 と圧力による融点降下 T_s との差 $T_0 - T_s$ を 1°C , $l = 0.02\text{ cm}$, $v = 10^3\text{ cm/s}$ とすると, $d = 0.5 \times 10^{-5}\text{ cm}$ となり, $0.05\text{ }\mu\text{m}$ の氷の融解が可能になる。速度が遅くなると融解水の厚さは一般に厚くなるであろう。しかし、これらの議論は融点降下が氷の表面温度より低くなる $T_0 - T_s > 0$ の領域でしか成り立たない。第12図でいうと圧力融解は -6°C 以上の温度に限られる。この例では t_0 が 10^{-5} 秒程度の極めて短い接触時間でも水膜の形成は行われている。しかし、摩擦材表面の粗さは通常この膜厚よりもはるかに大きいので、流体潤滑の摩擦条件にはほど遠い。

次に、界面の融解水を通して氷に圧力が加えられるものとすれば、 -22°C 以下ではいくら加圧しても融解水は発生しなくなる。つまり、この温度は圧力融解による流体潤滑の限界温度にあたる。この結論を支持するような実験結果は今のところ得られていない。

ところで第11図hに見られるような融解像は -30°C でも観察された。これを上記の圧力融解によって説明することはできない。この場合には、藤岡²⁵⁾ や曾田⁵⁴⁾ が考えているような固体にだけ圧力が加わり、融解水には圧力が加わらないとする式 (Pointing⁵⁵⁾ の式)、

$$\Delta T = T^0 (v_i/L) \Delta p \quad (14)$$

(ただし, ΔT は融点降下温度, T^0 は絶対温度であらわした氷の融点, v_i は氷の比容, L は氷の潜熱, Δp は圧力) を用いねばならない。この考えでは水の発生は説明できるが、その水はすみやかに氷と摩擦板の界面をはみでるものと考えられるので、潤滑に寄与できる可能性はない。中村⁵⁶⁾ は静水圧による圧力融解の限界温度よりはるかに低い -30°C で、氷にアクリル板を押しつけて、接触面のまわりに融解水の発生するのを観察した。写真hもこのような非静水圧下でできたものかもしれない。

3. 摩擦融解について

1939年 Bowden and Hughes¹⁾ は氷の摩擦面に生じた水の潤滑作用でスキーやスケートが滑ることは間違いないにしても、その水は圧力融解によるのではなく、主に摩擦熱によって生ずると考えた (Bowden らの摩擦融解説については木下⁵⁷⁾ の解説がある)。

ここでは、摩擦熱で氷の融解が可能かどうかを熱的な面から検討しよう。荷重を W 、動摩擦係数を μ_k とすると、スケートが単位長さ滑るときにする仕事は $\mu_k W/J$ (J は熱の仕事当量) である。ある瞬間のみかけの接触面内に分布する真実接触面の滑走方向の平均の長さを l とすると、滑走体が l だけ進む間に界面になされる仕事 Q は、

$$Q = (\mu_k W/J) l \quad (15)$$

と考えるとよい。この仕事が全部真実接触面の氷 (温度 $T^\circ\text{C}$) を融かすのに用いられたとすると、その瞬間の真実接触面の総和を A として、

$$\begin{aligned} d &= Q/\rho_i(L-cT)A \\ &= \mu_k W/\rho_i J(L-cT)A \end{aligned} \quad (16)$$

で与えられる厚さ d の氷を融かすことになる。ただし、 ρ_i は氷の密度、 L は氷の融解潜熱、 c は氷の比熱である。

一例として、 $\mu_k=0.04$ 、 $W=60 \text{ kg-wt}$ 、 $T=-20^\circ\text{C}$ 、 $A=0.04 \text{ cm}^2$ (第12図の -20°C でのかたさから)、 $l=0.02 \text{ cm}$ とすると、

$$d = 3 \mu\text{m} \quad (17)$$

の厚さの水膜が真実接触面に発生することになる。実際には Q の一部 fQ ($f < 1$) は氷や滑走体へ熱伝導で逃散するため d の値も幾分減少するであろう。それにしても圧力融解による水膜よりはるかに大きい。

熱伝導の式によると、始め均一温度 $T^\circ\text{C}$ にあった2個の半無限固体の界面に単位時間、単位面積当り q の割合で発生する熱源があるとき、界面の温度が 0°C まで上昇する時間 t は、

$$t = (T/Cq)^2 \quad (18)$$

で与えられる。ただし、 $C=2/\sqrt{\pi}(\sqrt{c_i\rho_i k_i}+\sqrt{c_s\rho_s k_s})$ で、添字 i は氷、 s はスケートを表わす。 s を鉄として比熱 c 、密度 ρ 、熱伝導率 k の値を代入して C の値を求めると、

$$C = 5.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{deg} \sqrt{s} / \text{cal} \quad (19)$$

となる。滑り速度を v とすると、 q は

$$q = (Q/A)(v/l) = (\mu_k W/JA)v \quad (20)$$

となる。 C 、 q の値を (18) 式に代入すると融解に必要な時間が求まる。滑走体の一つの真実接触面を通過する時間 t_0 は、

$$t_0 = l/v \quad (21)$$

だから、融解が可能となるためにはもう一つの条件、

$$t < t_0 \quad (22)$$

がみたされる必要がある。(18)~(21)式を用いて(22)式を書き直すと、

$$v > (JA'T/\mu_k CW)^2/l \quad (23)$$

となる。

例えば、水膜の厚さの計算に用いた数値を用いて v の値を求めると、

$$v > 3.5 \times 10^2 \text{ cm/s} \quad (24)$$

となる。このときの t_0 は 6×10^{-5} 秒という短い時間になるので、融解水の厚さも熱の散逸がないとしたときの(17)式の値にほぼ近いものと考えられる。しかし、この場合、速度 v が $3 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 以下では摩擦融解は生じない。摩擦融解発生臨界速度は温度、荷重、真実接触面の大きさと分布状況、滑走材の種類によるので一概には言えないが、ある値をもっていて、それ以下の速度には摩擦融解説を適用できない。

摩擦融解説では速度の大きいほど、摩擦材の熱伝導率の悪いものほど界面からの摩擦熱の散逸が少なくなる。それゆえ、速度の大きいほど、また熱伝導率の小さいものほど摩擦熱が有効に氷の融解に費されるため、それだけ厚い水膜が形成されて摩擦が小さくなるはずである。序論ではこれらの熱伝導効果、速度効果に対し多くの矛盾する結果のあることを述べた。

VI. 結 論

氷の柱面 (01 $\bar{1}$ 0) および底面 (0001) を摩擦面とする双結晶氷と鋼球の摩擦を荷重 W 、速度 V 、温度 T の関数として動摩擦係数 μ_k を調べ、摩擦痕幅 ϕ の測定を行った。得られた結果は凝着説 $\mu_k = k \frac{\pi}{4} \phi^2 s + \frac{\phi^3}{6R} p$ によって説明できる。

- 1) ほとんどすべての摩擦条件下で(01 $\bar{1}$ 0)面の μ_k は(0001)面の μ_k より大きい。
- 2) 荷重の小さい領域では μ_k は小さく一定値を示し、荷重 W の大きい領域では W の増大とともに μ_k が増大した。
- 3) 接触面の圧力は W と無関係に一定であるが、掘り起し面積と W の比は W とともに増大した。したがって、 W の大きい領域での μ_k の増大は掘り起し項による。
- 4) 速度 V の速い領域で μ_k は小さく一定、 V の遅い領域では V の減少とともに μ_k が増大した。
- 5) 摩擦痕幅 ϕ は V の大きい領域では小さく一定、 V の小さい領域では V の減少とともに ϕ が増大した。したがって、 V の小さい領域での μ_k の増大は ϕ の増大による。
- 6) 温度に対し μ_k の極小がある。温度 T の低い領域では T の低下とともに μ_k はゆるやかに増大し、 T の高い領域では T の増大とともに μ_k は急速に増大した。 ϕ は T の低い領域ではほぼ一定、 T の高い領域では T の増大とともに急速に増大した。

温度の高い領域での μ_k の増大は ϕ の増大によるものである。温度の低い領域での μ_k の増大は界面剪断強さ s および掘り起し強さ p が温度の低下とともに増大することによる。

- 7) μ_k は滑走体の直径 R の逆数 $1/R$ に比例する。この μ_k の増大は掘り起し面積の増大による(寸法効果)。
- 8) 7)の寸法効果から s 、 p を求め、荷重効果を凝着説で説明できることを示した。

- 9) 圧力融解説, 摩擦融解説を検討した結果これら両説が限られた条件下でしか成立しないことを指摘し, 氷の摩擦を説明するには不十分であることを述べた。

本研究を進めるに当り低温科学研究所の若浜五郎教授, 東海大学の松原清教授, 機械技術研究所の津谷裕子・渡辺真の各氏, 金沢大学の田中久一郎教授から多大の助言とご指導を受けたことを記して感謝の意を表わします。また, 実験装置の作成に当り大変お世話になった松森政治氏に感謝いたします。

文 献

- 1) Bowden, F. P. and Hughes, T. P. 1939 The mechanism of sliding on ice and snow. *Proc. Roy. Soc. A*, **172**, 280-298.
- 2) Niven, C. D. 1956 On the friction of heated sleigh runners on ice under high loading. *Can. J. Tech.*, **34**, 227-231.
- 3) 小林慎作・他 1970 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**, 243-259.
- 4) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦 1. 潤滑, **22**, 514-521.
- 5) 曾田範宗 1954 摩擦と潤滑. 岩波書店, 228 p.
- 6) 津谷裕子 1975 摩擦・摩耗の微視的研究. 機械技術研究所報告, 第 81 号, 107 pp.
- 7) Joly, J. 1887 The phenomena of skating and professor J. Thomson's thermodynamic relation. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, **5**, 453-454.
- 8) Reynolds, O. 1899 On the slipperiness of ice. *Mem. Proc. Man. Lit. Phil. Soc.*, **43**, No. 5, 1-7.
- 9) Skinner, S. 1903 Note on the slipperiness of ice. *Proc. Camb. Soc.*, **12**, 86.
- 10) Morphy, H. 1913 The influence of pressure on the surface friction of ice. *Phil. Mag., Ser. 6*, **25**, 133-135.
- 11) Bowden, F. P. 1953 Friction on snow and ice. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **172**, 280-298.
- 12) Bowden, F. P. 1955 Friction on snow and ice and the development of some fast-running skis. *Nature*, **176**, 946-947.
- 13) McConica, T. H. 1950 Sliding on ice and snow. Report to the Research and Development Branch, Office of the Quartermaster General, U. S. Army, American Ski Company, 46 p.
- 14) Niven, C. D. 1959 A proposed mechanism for ice friction. *Can. J. Phys.*, **37**, 247-255.
- 15) University of Minesota 1955 Friction on snow and ice. *SIPRE Rep.*, **17**, 286 p.
- 16) Pounder, E. R. 1965 Physics of ice. Pergamon Press, 151 p.
- 17) 対馬勝年 1976 氷の摩擦機構について. 潤滑, **21**, 287-294.
- 18) 藤岡敏夫 1963 雪櫃の抵抗 VI—積雪と板との摩擦 4. 低温科学, 物理篇, **21**, 31-44.
- 19) 対馬勝年・吉田順五 1969 氷の摩擦融解. 低温科学, 物理篇, **17**, 17-30.
- 20) Tabor, D. and Walker, J. C. F. 1970 Creep and friction of ice. *Nature*, **228**, 137-139.
- 21) Barnes, P., Tabor, D. and Walker, J. C. F. 1971 Friction and creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **324**, 127-155.
- 22) Schultz, H. H. and Knappwost, A. 1968 Die Festkörperreibung des Eises als Relaxationseffekt. *Wear*, **11**, 3-20.
- 23) 対馬勝年 1972 単結晶氷の摩擦の異方性. 低温科学, 物理篇, **30**, 211-213.
- 24) Evans, D. C. B., Nye, J. F. and Cheeseman, K. J. 1976 The kinetic friction of ice. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **347**, 493-512.
- 25) 藤岡敏夫 1962 雪櫃の抵抗 V—積雪と板との平面摩擦 III. 低温科学, 物理篇, **20**, 159-179.
- 26) 藤岡敏夫 1958 雪櫃の抵抗 IV—積雪と板との平面摩擦 II. 低温科学, 物理篇, **17**, 31-52.

- 27) Pfalzner, P. M. 1947 The friction of heated sleigh runners on ice. *Can. J. Res.*, **25**, 192-195.
- 28) Niven, C. D. 1956 On the effect of speed on the kinetic friction of some plastic materials on ice. *Can. J. Phys.*, **34**, 362-369.
- 29) Butkovich, T. R. 1954 Hardness of single ice crystals. *SIPRE Res. Pap.*, **9**, 12 pp.
- 30) Butkovich, T. R. 1954 Ultimate strength of ice *SIPRE Res. Rep.*, **11**, 12 pp.
- 31) Tusima, K. 1977 Friction of a steel ball on a single crystal of ice. *J. Glaciol.* (Proc. Symp. Appl. Glaciol. 1976), **19**, 印刷中.
- 32) バウデン・テイバー (曾田範宗訳) 1961 固体の摩擦と潤滑. 丸善, 332 p.
- 33) 例えば, 中谷宇吉郎 1956 氷単結晶の物理—I. 内部融解からみたその構造. *科学*, **26**, 272-279.
- 34) Higuchi, K. 1958 The etching of ice crystals. *Acta Metallurgica*, **6**, 636-642.
- 35) Glen, J. W. 1955 The creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **228**, 519-538.
- 36) 若浜五郎 1957 氷の流動学的性質について I. 低温科学, 物理篇, **16**, 225-240.
- 37) Jellinek, H. H. G. and Brill, R. 1956 Viscoelastic properties of ice. *J. Appl. Phys.*, **27**, 1198-1209.
- 38) Bass, R., Rossberg, D. und Ziegler, G. 1957 Die elastischen Konstanten des Eisens. *ZS Physik*, **149**, 199-203.
- 39) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 II. 低温科学, 物理篇, **35**, 23-33.
- 40) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 III. 低温科学, 物理篇, **35**, 35-46.
- 41) Whitehead, J. R. 1950 Surface deformation and friction of metals at light loads. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **201**, 109-124.
- 42) Bowden, F. P. and Tabor, D. 1964 The friction and lubrication of solids II. Oxford, 544 pp.
- 43) Arnold-Alabieff, V. I. 1936 The external friction of ice. *Intern. Geophys. Union Assoc. Sci. Hydrology Bull.*, **23**, 563-570.
- 44) Niven, C. D. 1954 The effect of high loading on the kinetic friction of ice. *Can. J. Phys.*, **32**, 782-789.
- 45) Jellinek, H. H. G. 1957 Adhesive properties of ice. *SIPRE Res. Rep.*, **38**, 20 pp.
- 46) Raraty, L. E. and Tabor, D. 1958 The adhesion and strength properties of ice. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **245**, 184-201.
- 47) 例えば, 吉田順五 1971 雪の科学. 日本放送協会, 300 pp.
- 48) 対馬勝年・藤井俊茂 1973 氷の剪断強度の測定. 低温科学, 物理篇, **31**, 33-43.
- 49) 北原武道・河村俊行 1970 氷の硬度の測定 II—主に結晶面による硬度の違いについて. 低温科学, 物理篇, **28**, 81-95.
- 50) Jaeger, J. C. 1942 Moving sources of heat and temperature at sliding contacts. *Proc. Roy. Soc. New South Wales*, **76**, 203.
- 51) 佐藤健治 1962 表面工学概論. 養賢堂, 298 pp.
- 52) Nye, J. F. 1967 Theory of regelation. *Phil. Mag., Ser. 8*, **16**, 1249-1266.
- 53) Ingersoll, L. R. et al. 1943 Heat conduction. McGraw-Hill, 278 pp.
- 54) 曾田範宗 1955 摩擦現象. 日本物理学会誌, **10**, 1-13.
- 55) Pointing, J. H. 1881 Change of state: Solid-liquid. *Phil. Mag.*, **12**, 32-48.
- 56) Nakamura, T. 1966 A water-like film produced by pressure on the surface of ice crystals. *Physics of Snow and Ice* (Ed. Oura), Inst. Low. Temp. Sc., 247-258.
- 57) 木下是雄 1956 スキーの物理学—Bowden の研究を中心にして. *科学*, **26**, 341-346.

Summary

Having a close connection with the slipperiness of skating and skiing or the slipping of vehicles and aircraft; friction on ice calls for the knowledge of its properties and mechanism. The frictional experiments were designed using hemispherical sliders on the ice plate.

Friction of a steel ball on ice was measured as a function of load, velocity, temperature and diameter of a slider on various crystallographic surfaces, and the frictional track was microscopically observed.

A slider of a steel ball, 6.4 mm in diameter, was placed on an ice plate and a definite load was applied on the ball by the use of a cantilever. Keeping the ball fixed, the ice plate was then moved with various constant velocities ($1.5 \times 10^{-3} \sim 0.18$ cm/s). The frictional resistance was automatically recorded by means of a strain gauge (U-gauge) and an electric recorder.

Before each experiment the steel ball was cleaned by immersing it in an ultrasonic cleaning-bath filled with a mixture of alcohol and acetone and then in a bath filled with distilled water; it was cleaned again by washing it in the bath of distilled water and dried under an infrared lamp.

In order to clarify the anisotropy of friction on different crystallographic surfaces of ice, bicrystals composed of both basal (0001) and prismatic (01 $\bar{1}$ 0) surfaces were prepared. The surface was planed flat with a lathe and annealed until the fine grooves created by lathing were completely removed by sublimation and surface diffusion.

Figure 4 shows a typical record of friction in the process of sliding. As seen in this figure, the frictional coefficient, μ , abruptly increased when the slider began to move on the prismatic surface, and then the value of μ became nearly constant. When the slider passed the boundary of the bicrystal and entered on the basal surface, the value of μ markedly decreased and also became nearly constant.

Figures 5, 6, 7, 8 and 11 show changes of the values of μ on basal and prismatic surfaces against applied load, frictional velocity, temperature and diameter of a slider. As seen in these figures, the value of μ on the (01 $\bar{1}$ 0) surface was always higher than that on the (0001) surface in spite of the fact that values of applied load, frictional velocity, temperature and size of a slider were widely changed. These results may be explained if we recognize that the (0001) surface has the larger hardness and smaller shear strength than those of the (01 $\bar{1}$ 0) surface (Butkovich²⁶; Tusima and Fujii⁴¹).

As seen in Fig. 5, the values of μ were nearly constant for smaller values of applied loads, but increased with increasing loads for higher values of applied loads. This fact means that the Amonton's law is not applicable for the friction of ice in higher loads.

The values of μ gradually decreased with the increasing frictional velocities (Fig. 6). According to a microscopic observation of a track caused by friction, the width of the track increased with the increases in load and temperature and decreased with the increase in frictional velocity. Heavy recrystallization and a number of cracks were observed on and along the track. These results indicate that the surface of ice was deformed and fractured by the shear and ploughing by a slider. Since the deformation and fracture of ice produced by the slider may be significant with the increase of an applied load, the value of μ must be increased with the increasing applied load (Fig. 5).

The increase of the value of μ obtained at low frictional velocities (Fig. 6) suggests that

contact area between the slider and ice surface may increase with the lowering of velocity owing to the creep of ice. The temperature dependence of the values of μ are shown in Fig. 7. The values of μ increase with lowering temperatures in lower than -5°C and with increasing temperature higher than that. It can be considered that the increase of friction in a higher temperature range is caused by the depression of a slider owing to the creep of ice. The temperature at which μ becomes minimum shifted to a higher temperature when the velocity was decreased.

The values of μ on both the basal and prismatic surfaces obtained at -10°C are shown in Fig. 8 as a function of applied load and frictional velocity. It should be noted that the values of μ obtained in this experiment are extremely lower than those measured at low velocities by Bowden and Hughes⁹.

The size effect of sliders is shown in Fig. 10. The values of μ increased with the decrease in the diameter of the ball for a smaller range of diameters than 9.5 mm when the load, the velocity and the temperature were 475 g, 7.4×10^{-3} cm/s and -10°C , respectively. However, the friction remained unchanged when a steel ball larger than 9.5 mm in diameter was used. If we plotted the value of μ to the inverse diameter, we can get a linear relationship between the friction and the reciprocal of the diameter as shown in Fig. 10 b.

It is shown that the frictional properties of ice are not sufficiently explained by the pressure melting and the frictional melting theory. Assuming that the frictional resistance of the ice surface for a sliding steel ball is caused by the shear and ploughing by the slider at the contact area, we can calculate μ_s frictional coefficient for shear and μ_p frictional coefficient for ploughing. The expressions for μ_s and μ_p are given by Bowden and Tabor.

$$\mu_s = k \cdot \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 s/W \quad \text{and} \quad \mu_p = k' \cdot \frac{\phi^3}{6R} \cdot pW,$$

where ϕ is the width of track and R the diameter of a steel ball, W the applied load, s the interfacial shear strength, p the specific ploughing strength, and k and k' the constants for shape factor.

We can well explain the obtained results by the adhesion theory. The values of friction, μ_k , obtained from the present experiments and, $\mu_s + \mu_p$, predicted from the adhesion theory are tabulated in Table 3. These values agree very well for each run of experiment. It may be concluded that the kinetic friction of ice is caused by shear and ploughing in terms of the adhesion theory.