



Title	単結晶氷の摩擦に関する研究 III : 結晶方位による動摩擦係数、摩擦痕幅、掘り起し強さの異方性
Author(s)	対馬, 勝年; TUSIMA, Katutosi
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 35-46
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18325
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p35-46.pdf



単結晶氷の摩擦に関する研究 III*

—— 結晶方位による動摩擦係数, 摩擦痕幅, 掘り起し強さの異方性 ——

対馬 勝年

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. 序 論

かたい鋼球滑走体が銅等の単結晶上をすべる場合、結晶面によって摩擦が異なるばかりでなく、同一結晶面上でも滑る方向によって摩擦係数や摩擦痕幅の変わることが知られている¹⁾。銅単結晶では摩擦の大きい方向で、摩擦痕幅は逆に狭いことから、摩擦係数の異方性の解釈は単純ではない。このような摩擦の異方性に関する研究は摩擦過程での加工硬化や滑走体前面の掘り上がり注目して進められてきたようである。これらに関しては津谷²⁾の解説がある。

Dyer³⁾は銅単結晶とサファイヤ球とのころがり摩擦を行って、ころがる方向により摩擦係数 μ が異なり($\mu\langle 110\rangle/\mu\langle 100\rangle=1.3$)、摩擦の大きい $\langle 110\rangle$ 方向で摩擦痕幅は逆に狭くなるという結果を得た。Dyerは摩擦痕終端付近の微小かたさを測定し、終端付近のかたさは無変形部のそれより大きく、その値は摩擦の大きい $\langle 110\rangle$ 方向が最も大きかった。彼は滑走体前面の加工硬化度が方向によって異なることに摩擦の異方性の原因があると考えた。しかし、微小かたさの値を用いた彼の計算では摩擦抵抗が実測値の10倍も大きくなるという矛盾がある。

Bailey-Gwathmey⁴⁾は銅単結晶上に大きさの異なるサファイヤ球面を滑らせ、摩擦係数と摩擦痕幅に関しDyerと同様の異方性を認めた。しかし、ダイヤモンド角錐を滑走体とした場合には、摩擦係数の最大と最小の方向は逆転した。Barquinsら⁵⁾は銅-サファイヤ球間の滑り摩擦における滑走体前面での銅の変形(掘り上りの形成)および摩擦過程で発生するすべり線の観察を行った。田中・織田⁶⁾は滑走体の寸法効果および荷重効果を調べて、小さい球面および大きい球面の両極の滑走体では摩擦と摩擦痕幅の異方性は減少した。微小かたさの測定ではDyerと同様、摩擦痕上および摩擦痕終端付近で微小かたさが無変形部の2倍程度まで増大すること、滑走体前面の銅の掘り上り変形の方位による異方性に注目した。

これらの他にも銅単結晶の摩擦の異方性については、数多くの研究があるが、異方性の定量的議論には未だ不十分な点が多いようである。

一方、Bowden-Brooks⁷⁾はダイヤモンド円錐滑走体とダイヤモンド、酸化マグネシウム、フッ化リチウムの各単結晶との摩擦を行って、滑走体頂角の鋭いほど摩擦の異方性が大きい

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1861号

こと、摩擦係数の大きい方向で摩擦痕幅も大きいという銅単結晶に於けるのとは逆の関係を得た。

最近、曾田ら^{8),9)}は銅およびアルミニウム単結晶上の往復摩擦を行って、すべり線間の相互作用に注目した研究を進めている。

以上の研究では、摩擦係数の異方性が摩擦痕幅、表面変形、加工硬化度の異方性を用いて説明されてきた。しかし、摩擦痕幅や剪断強さ、掘り起し強さの異方性から、摩擦係数の異方性を定量的に解明しようという試みはまだないようである。

氷の場合、結晶面により摩擦係数の異なることはすでに述べた。しかし、一つの氷の結晶面上ですべり方位を変えたときの摩擦を調べたという例はきかない。

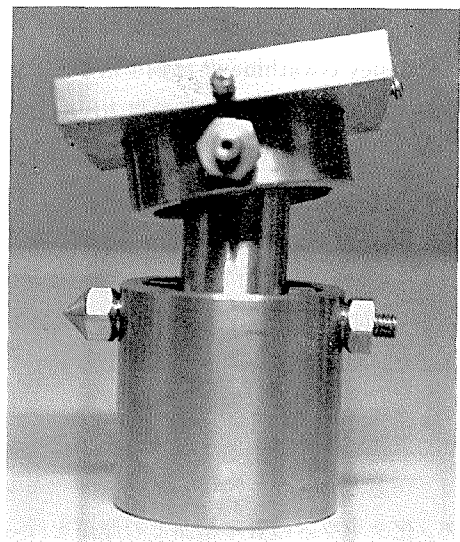
Butkovich¹⁰⁾は氷の柱面の引掻きかたさの測定で方位によるかたさの異方性を認めた。Offenbacherら¹¹⁾は同じ柱面上の微小かたさ(ヌープかたさ)の異方性を底面すべり $\{0001\}$ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ と非底面すべり $\{11\bar{2}0\}$ $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ によって説明した。したがって、柱面上の摩擦もまた異方性をもつことが予想される。

本報では同一結晶面上のすべり方位による動摩擦係数の異方性を調べようとしたのであるが、試料表面の処理や摩擦条件によって摩擦曲線に激しい変動の生ずることが多く、微妙な摩擦の異方性を解析するに足るなめらかな摩擦曲線を得るのに苦労した。氷ではまた金属で一般に認められるような加工硬化は少いとされるので、そのような場合の動摩擦係数や摩擦痕幅がどのような異方性を示すかに興味を持たれる。

II. 実験方法

実験装置は前報 I²⁾, II³⁾ で用いたのと同じである。アクリルの円板に凍着された氷試料が試料受けの中で水平面に回転できる。使用した氷は前回同様アラスカの氷河から採取された差し渡しが 20 cm ほどの巨大単結晶である。この氷にチンダル像およびエッチピットを作って結晶面を定め、結晶面切り出し用自在回転台(第 1 図)に凍着させた後、旋盤に取りつけて低速度で削った。この切削面をアクリル円板(報告 I の第 1 図 A)に凍着させ、再度削った後、 $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ で 2 時間アニールし、続いて実験温度に 6 時間以上おいてから摩擦装置の試料受けにセットした。これらの操作で表面に光沢をもつ試料だけを実験に用いた。

試料の上にタングステンカーバイド球をのせ、一定速度で動径方向の摩擦を行う。使用した氷の摩擦面は $(01\bar{1}0)$, $(11\bar{2}0)$, (0001) , および (0001) 面が摩擦面に対し 20 度と 30 度傾いた面の 5 種で、滑走体の直径は 2.3 および 6.4 mm である。試



第 1 図 結晶面切り出し用自在回転台

料を 10° ないし 5° おきに方向を変えながら摩擦を行い、顕微鏡に取りつけた測微接眼レンズによって摩擦痕幅を測定した。

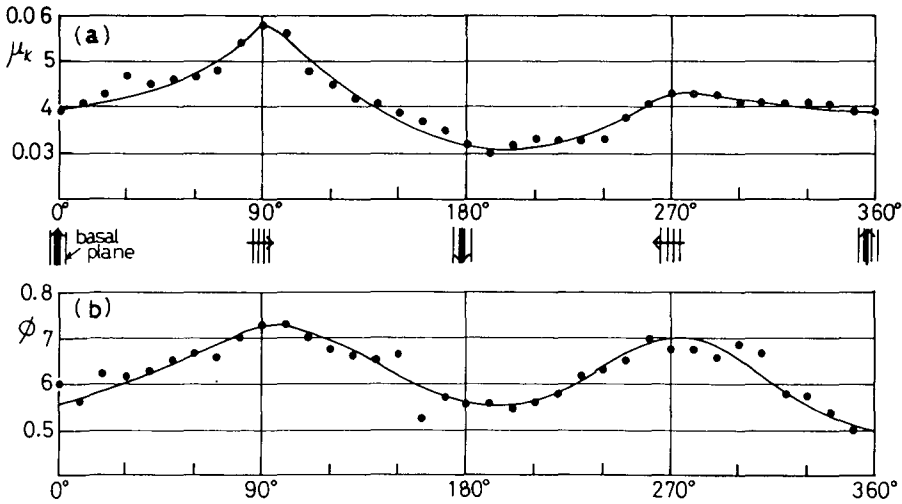
温度を $-5 \sim -30^\circ\text{C}$ 、速度を $3.7 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、荷重を $690 \sim 1440 \text{ g}$ の間で変え、摩擦痕上に削り粉の発生しない塑性変形領域で実験を行った。

III. 結 果

1. $(01\bar{1}0)$ 面の動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ の異方性

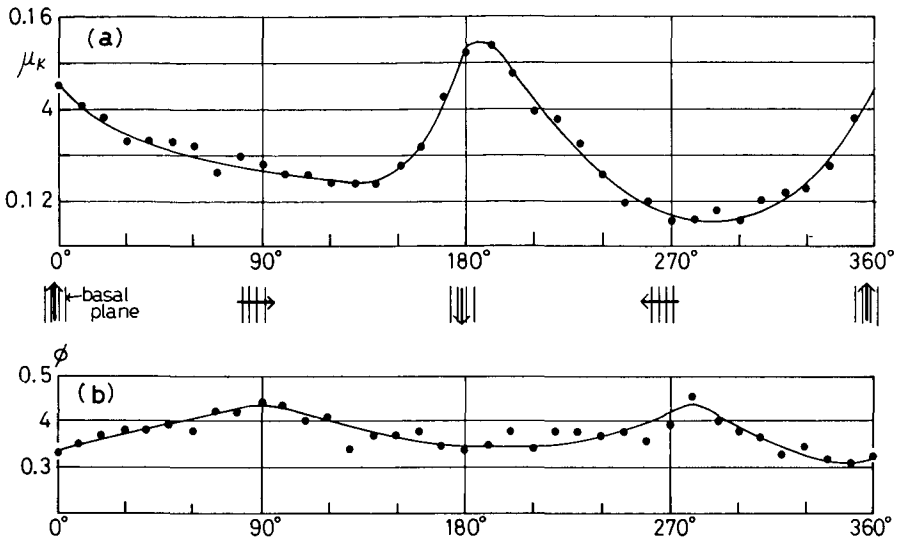
$(01\bar{1}0)$ 面上の摩擦では氷の結晶学的すべり面 (0001) が表面に垂直に入っていて、摩擦方向を変えるとすべり面との角度が変わる。 μ_k と ϕ はこの角度に関連した異方性をもつことが予想される。

第2図 a, b に温度 -10°C での μ_k および ϕ をすべり面からの角度の関数として示した。速度は $6.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、荷重は 1440 g 、滑走体直径は 6.4 mm である。 μ_k は 0.03 から 0.06 と小さいが、 (0001) 面に直交する $\langle 0001 \rangle$ 方向で μ_k 極大、 (0001) 面に平行な $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向で極小となり、その比は 1.46 である。これに対応して ϕ にも異方性があり、 μ_k の極大と ϕ の極大、 μ_k の極小と ϕ の極小が一致した。同一条件下で荷重を 475 g に減らすと、滑走中の摩擦抵抗の変動が増して、異方性を明確に識別することが困難になった。同様の摩擦の変動は滑走体を 2.34 mm に変えたときにも発生した。

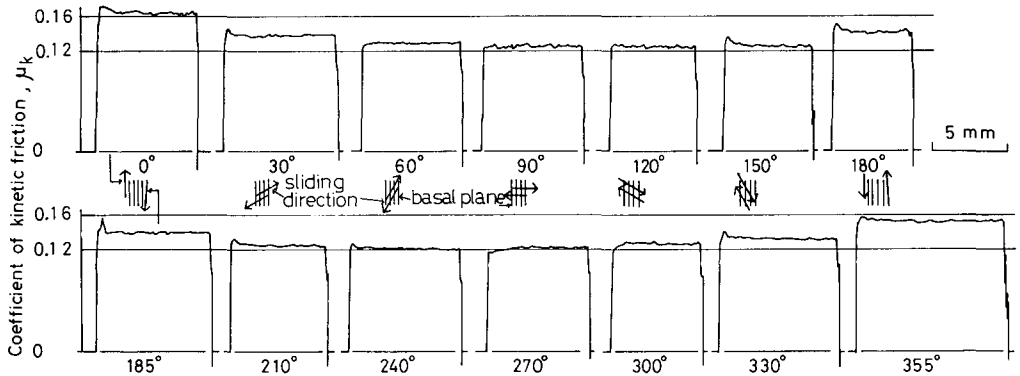


第2図 $(01\bar{1}0)$ 面の動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ (mm) の異方性、温度 -10°C
 荷重: 1440 g 、速度: $6.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、滑走体直径: 6.4 mm 、
 横軸は $[10\bar{1}0]$ からの角度

しかしながら、上記の μ_k と ϕ の関係は温度 -21°C の測定では逆転した。第3図 a, b に速度 $7.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、荷重 690 g 、滑走体直径 2.34 mm での μ_k と ϕ を示した。この場合には、第4図に示すように、滑走中の摩擦の変動は非常に小さかった。第3図で μ_k および ϕ はそれぞれ2つの極大および極小をもっているが、 μ_k の極大および極小の方向が -10°C の場合とは逆になっている点が注目される。しかし、 ϕ の異方性は -10°C の場合と変わらない。つまり



第3図 (01 $\bar{1}0$)面の動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ (mm) の異方性, 温度 -21°C
 荷重: 690 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 滑走体直径: 2.34 mm,
 横軸は $[10\bar{1}0]$ からの角度



第4図 (01 $\bar{1}0$)面上の摩擦曲線の記録例

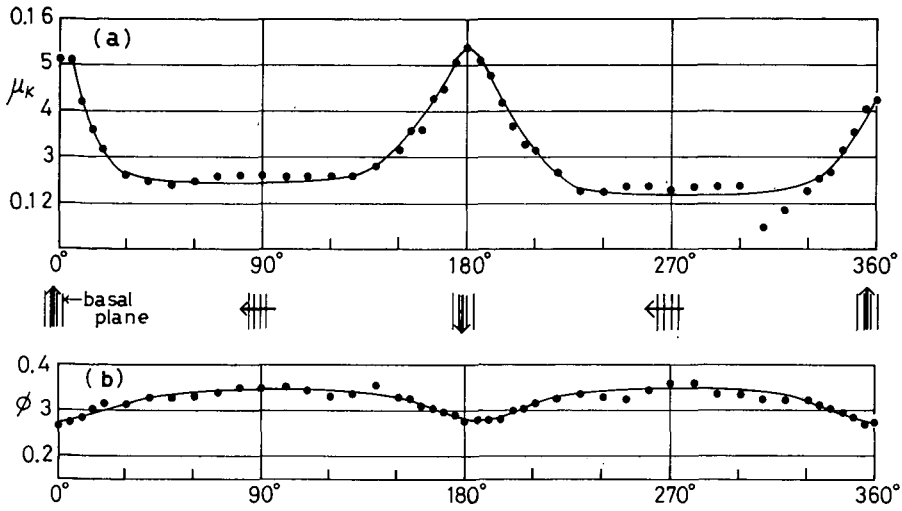
荷重: 690 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -25°C , 滑走体直径:
 2.34 mm。すべり方向を↑印で示した

μ_k は ϕ 極小の (0001) に直交する方向で極大となった。これと同様の結果はもっと低い温度の -30°C でも得られた。

-21°C で滑走体の直径を 6.4 mm に変えると, 摩擦の変動が大きくなったが, 異方性の傾向は直径 2.34 mm の場合と変らなかった。

2. (11 $\bar{2}0$)面の動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ の異方性

(11 $\bar{2}0$)面においても (01 $\bar{1}0$)面と同様の μ_k と ϕ の異方性が観察された。第5図に μ_k と ϕ をすべり方位の関数として示した。速度は 7.4×10^{-3} cm/s, 滑走体の直径は 2.34 mm, 荷重 690 g である。 μ_k は (01 $\bar{1}0$)面の -21°C (第3図) の場合と同様, (0001)面に平行な滑りで極大, (0001)面に直交する滑りで極小となった。



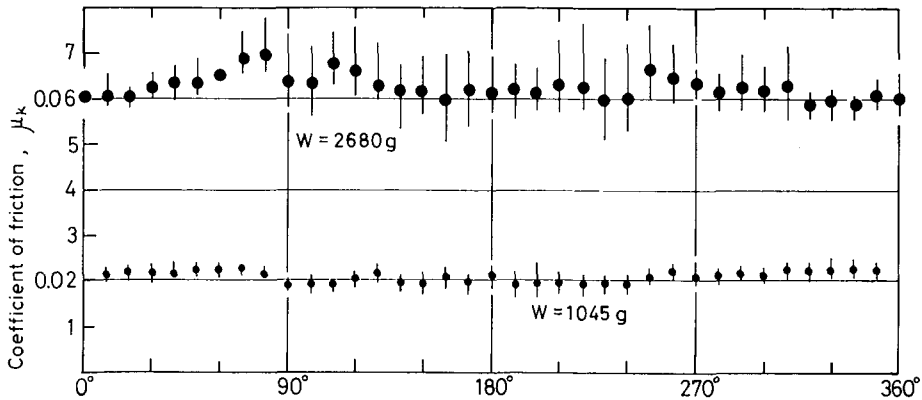
第5図 (11 $\bar{2}$ 0)面上での動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ (mm) の異方性, 温度 -25°C
 荷重: 690 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 滑走体直径: 2.34 mm,
 横軸は $[11\bar{2}0]$ からの角度

温度 -10°C 以上では μ_k の異方性が逆転し, $\langle 0001 \rangle$ 方向が極大, $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 方向が極小となった。 ϕ は $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 面の場合と同様温度に関係なく $\langle 0001 \rangle$ 方向で極大, $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ 方向が極小であった。

3. (0001) 面の摩擦

第6図に温度 -10°C , 速度 7.4×10^{-3} cm/s, 滑走体直径を 6.4 mm とし荷重を 1045 g, および 2680 g としたときの (0001) 面上での μ_k をすべり方位の関数として示した。細いたての線は摩擦の変動幅を示す。

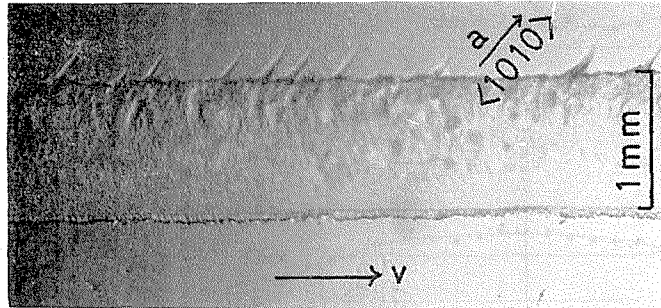
荷重 1045 g での μ_k は 0.02 内外, 荷重 2680 g では $\mu_k = 0.06 \sim 0.07$ の範囲にあるが, 結晶学的異方性に対応するような摩擦の異方性を認めるのは難しい。



第6図 (0001) 面の動摩擦係数 μ_k

大きい黒丸は荷重 2680 g, 小さい黒丸は荷重 1045 g, 速度:
 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -20°C , 滑走体直径: 6.4 mm

(0001) 面上では摩擦条件をいろいろに変えても、摩擦曲線上の変動を消去することができなかった。しかし、摩擦痕の外側には第7図に示すような $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向へ伸びるつのがしばしば観察された。



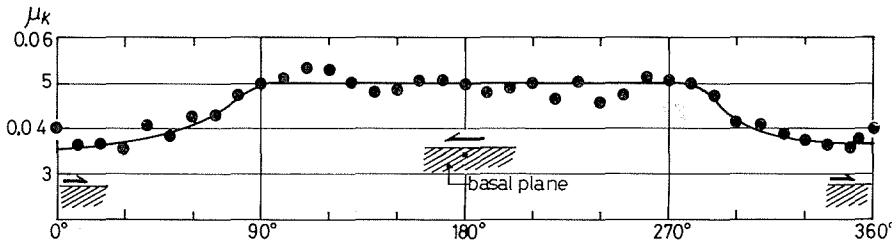
第7図 (0001)面の摩擦痕

荷重: 3100 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -10°C , 滑走体直径: 6.4 mm。
摩擦痕の外側 α -軸 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向へつのが(再結晶)が伸びている

4. (0001)面が摩擦面に対し傾斜している場合の摩擦の異方性

(0001)面が表面に対しわずかに傾いた場合には, Duwell¹⁴⁾がサファイヤの摩擦で示したように, 底面に沿う方向と逆なでする方向との滑りに μ_k の違いの生ずることが予想される。

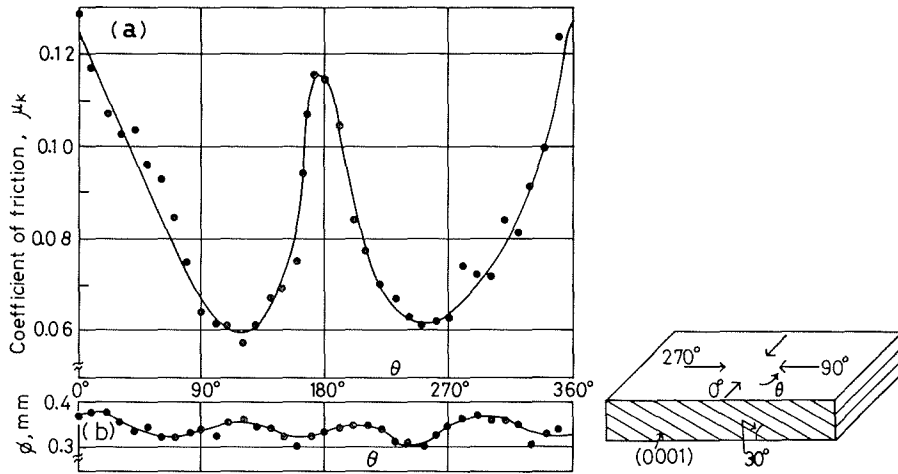
第8図は温度 -19°C , 速度 7.4×10^{-3} cm/s, 荷重1600 gとして直径6.4 mmのスチール球を滑らせたときの μ_k を示した。この試料では(0001)面が表面と20度の角度で交叉しており, μ_k は順なで方向で0.036という小さい値を示し, これと正反対の逆なで方向で0.05という大きい値を示した。



第8図 (0001)面が表面に 20° 傾斜した面の動摩擦係数 μ_k

荷重: 1600 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -19°C ,
滑走体直径: 6.4 mm

第9図は(0001)面が表面と 30° で交叉した場合の結果である。 μ_k は(0001)面の稜に沿う方向に最大の0.13, これに直交する方向に最小0.06があり, 2倍もの異方性を示した。しかし, この場合には(0001)面に対する順逆方向による μ_k の違いは殆んどなかった。 ϕ も同図に見られるように方向により多少の違いはあるが, 柱面上で認められたような μ_k との対応関係はない。

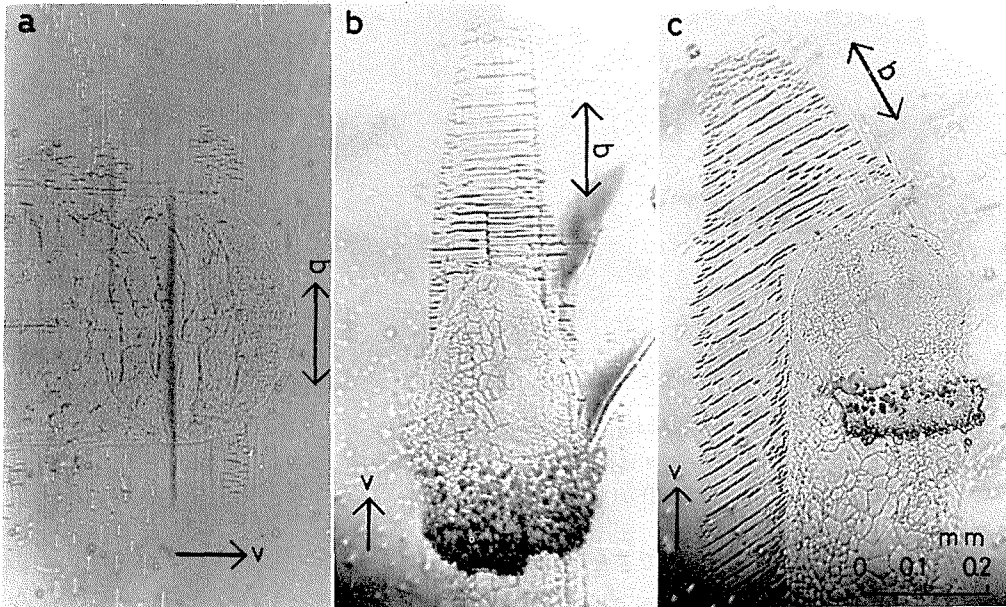


第9図 (0001)面が表面に30°傾斜した面の動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ (mm)

荷重: 690 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -20°C , 滑走体直径: 2.34 mm, 横軸の θ は底面に平行な方向となす角度

5. 摩擦痕の観察

すでに述べたように、柱面上での摩擦痕幅 ϕ はすべり方位によって変り、その異方性は温度によって変わらなかった。



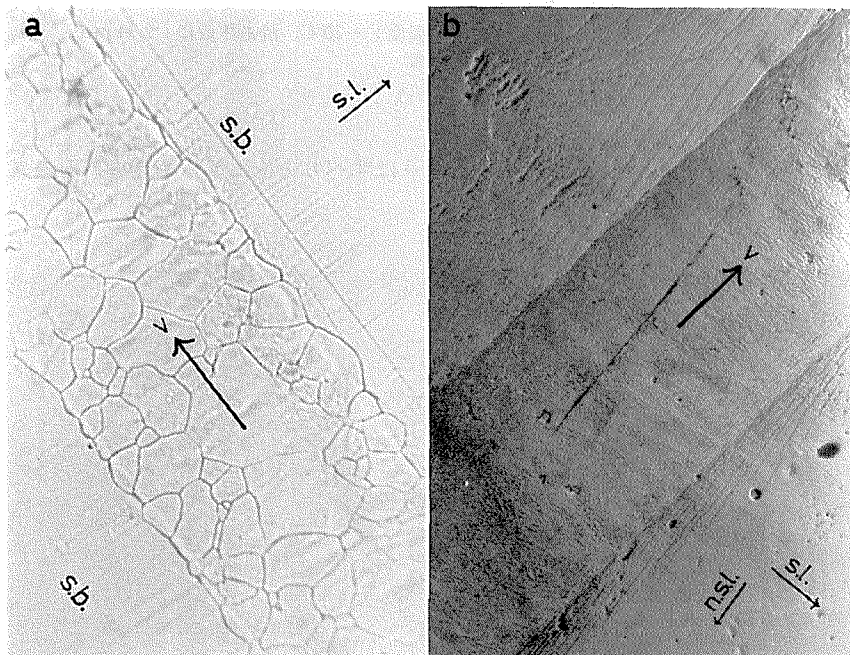
第10図 摩擦痕終端に現われたすべり線

摩擦方向, a: $\langle 0001 \rangle$, b: $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, c: $\langle 0001 \rangle$ から 30° 傾斜, $(01\bar{1}0)$ 面。
荷重: 690 g, 速度: 7.4×10^{-3} cm/s, 温度: -20°C , 滑走体直径: 2.34 mm。すべり方向を \rightarrow , (0001) 面を \leftrightarrow で示した。

摩擦痕終端付近には第10図に見られるすべり線が観察された。同図aの $\langle 0001 \rangle$ 方向のすべりでは、すべり線が摩擦痕と直角に発生し、摩擦痕前面にはすべり線がみられない。図bの底面に平行な $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向のすべりではすべり線が細い筋となって滑走体前方に伸びている。この場合、摩擦痕側面には顕著なすべり線は見られない。滑走方向が底面と 30° の角をなす図cではすべり線が斜め前方に伸び、主として摩擦痕の片側にだけ発生している。

以上いずれの場合にもすべり線は滑走方向に関係なく(0001)面内にあることがわかる。次にどの図にもこの底面すべりに直交する $\langle 0001 \rangle$ 方向にコントラストの強い線が見られる。図cではその線がほぼ 25μ 間隔に規則的に並んでいて、線の長さは 0.5mm に達するものもある。この線は表面にだけ見られるので、結晶の内部にはこれに対応するクラックが認められない。以上の点から考えると、黒い線はすべり線(非底面すべり)である可能性が強い。

すべり線の他に摩擦痕上には各図にみられるような再結晶ができたり、図aのような劈開クラックが結晶内部に発生することが多い。



第11図 摩擦痕上に現われた小傾斜角境界(a)と非底面すべり(b)

→vはすべり方向, s.b.は小傾斜角境界, s.l.は底面すべりの方向, n.s.l.は非底面すべりの方向を示す

第11図aは摩擦痕の外側にできた小傾斜角境界を示す。 $(01\bar{1}0)$ 面の $\langle 0001 \rangle$ 摩擦で、摩擦痕に直角に伸びるすべり線(底面すべり)に直交(摩擦方向に平行)する長い小傾斜角境界があり、この境界の両側で底面が 7° 折れ曲っていた。同図bに底面が摩擦面に対し 45° 傾斜した場合の摩擦痕を示した。摩擦痕の外側には非底面すべりと思われるコントラストの強い線が $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 方向に伸びている。この線が非底面すべりだとすると、すべり系は $\{11\bar{2}0\}\langle 10\bar{1}0 \rangle$ となる。

IV. 議 論

水の摩擦は前報 I²⁾, II³⁾ で述べたように結晶面によって異なるのみならず、本報で述べたように同一結晶面上でもすべり方位によって異なることがわかった。しかしながら、動摩擦係数の異方性は結晶固有のものではなく、温度により異方性の方向が逆転することもわかった。摩擦痕幅にも異方性があるが、異方性の傾向は温度によって変化しなかった。

以下、摩擦痕幅 ϕ 、掘り起し強さ p および動摩擦係数 μ_k の異方性の順に議論を行う。

1. 摩擦痕幅の異方性について

(01 $\bar{1}0$) 面上 $\langle 0001 \rangle$ 方向の摩擦では第 10 図に見られるように、すべり線が摩擦痕と直角につき溝幅を最もよく拡大する方向に伸びている。一方、これと直角な $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向に摩擦する場合には、すべり線は摩擦方向と平行な滑走体前方に伸びている (第 10 図 b) ので変形は摩擦痕幅の拡大に寄与しない。

以上のように摩擦痕幅の異方性は、氷のすべり面が (0001) であることによって説明される。

2. 掘り起し強さ p の異方性について

タングステンカーバイドのようにかたい球面が氷のように相対的にやわらかい平板上を低速度で滑るときの動摩擦係数 μ_k は次式で与えられる。

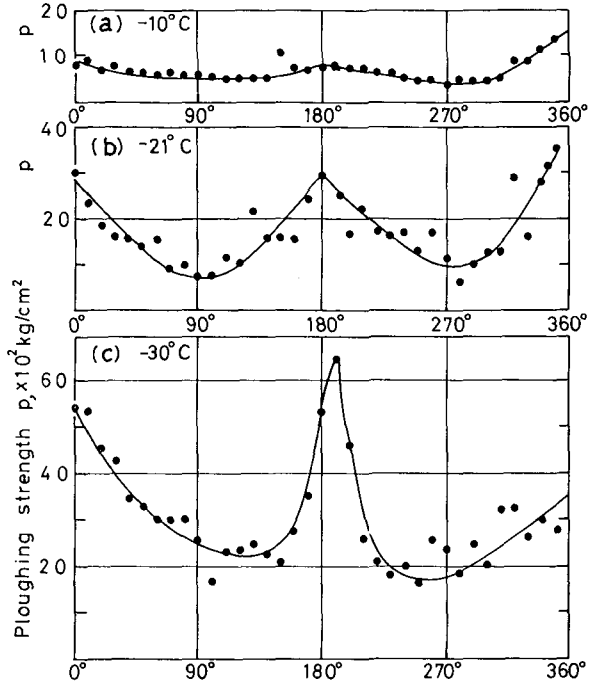
$$\mu_k = \left(k \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 s + k' \frac{\phi^3}{6R} \cdot p \right) \cdot \frac{1}{W} \tag{1}$$

ただし、 ϕ は摩擦痕幅、 s は界面剪断強さ、 p は掘り起し強さ、 R は滑走体直径、 W は荷重、 k, k' は定数である。

報告 I では接触面の形状因子 k ($1/2 \leq k \leq 1$) を導入したが、より正確には Barquins ら⁵⁾ および田中ら⁶⁾ が銅単結晶の摩擦の異方性で強調しているように滑走体前面のもり上がりに対する掘り起し断面積の補正因子 k' ($k' \geq 1$) を導入する必要がある。

(1) 式から p は、

$$p = \left(\mu_k W - k \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 s \right) \cdot \frac{6R}{k' \phi^3} \tag{2}$$



第 12 図 掘り起し強さの異方性 (01 $\bar{1}0$)

a: -10°C , b: -21°C , c: -30°C . 第 2, 3 図の μ_k, ϕ の実測値を用いて計算 (黒丸), 黒丸をつないだのが実線

となる。(01 $\bar{1}$ 0)面について第2,3図に示した μ_k, ϕ の実測値をもとに計算した p の値を第12図に黒丸で示した。ただし、簡単化のため、 k は0.8, k' は1(もり上りなし)とし、 s の値としては前報IIの結果を用いた。計算によると剪断抵抗は掘り起し抵抗の3分の1程度であった。しかも、 p は最小の〈0001〉方向と最大の〈11 $\bar{2}$ 0〉方向で2~3倍の大きな異方性をもっているため、 μ_k の異方性は主に掘り起し項によると考えてよいであろう。

〈11 $\bar{2}$ 0〉方向で p が最大をとることは第10図からも説明できる。この方向のすべりでは滑走体前面に生じた変形領域を動かす際に大きな抵抗が滑走体に加わるため掘り起し抵抗が大きくなる。逆に p が最小の〈0001〉方向のすべりでは滑走体前面には目立った変形領域がなく、そのため p の増大も生じていない。

3. 動摩擦係数 μ_k の異方性について

上記2節では、摩擦痕幅 ϕ と p の異方性を底面すべりによって説明した。

(1)式からわかるように μ_k は ϕ および p の大きいほど大きくなる。第1表には ϕ と p の異方性の大きさを比 $(\phi\langle 11\bar{2}0 \rangle / \phi\langle 0001 \rangle)^3$ および $p\langle 11\bar{2}0 \rangle / p\langle 0001 \rangle$ で示し、掘り起し項の異方性 $(p\phi^3\langle 11\bar{2}0 \rangle) / (p\phi^3\langle 0001 \rangle)$ を実測された μ_k に対比して示した。 ϕ と p の極大および極小の方向はお互い正反対の方向に位置しているのが注目される。

第1表 動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ , 掘り起し強さ p の間の関係の要約

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

温 度	$\left(\frac{\phi\langle 11\bar{2}0 \rangle}{\phi\langle 0001 \rangle}\right)^3$	$\frac{p\langle 11\bar{2}0 \rangle}{p\langle 0001 \rangle}$	$\frac{\phi^3 p\langle 11\bar{2}0 \rangle}{\phi^3 p\langle 0001 \rangle}$	$\left(\frac{\mu_k\langle 11\bar{2}0 \rangle}{\mu_k\langle 0001 \rangle}\right)_{\text{exp.}}$
-10°C	0.40	1.8	0.72	0.67
-21	0.39	3.4	1.3	1.3
-30	0.51	2.8	1.4	1.2

第1表で、-10°Cでは p の異方性よりも ϕ^3 の異方性の方が大きいため、 μ_k の異方性は ϕ の異方性に支配され、-21°C以下では p の異方性が優勢となるため μ_k は p の異方性に支配される。そのため μ_k の極大と極小は温度により逆転する。

V. ま と め

(01 $\bar{1}$ 0), (11 $\bar{2}$ 0), (0001)その他の面について、すべり方位による動摩擦係数と摩擦痕幅の異方性を調べた結果以下のことがわかった。

1. (01 $\bar{1}$ 0), (11 $\bar{2}$ 0)面では摩擦痕幅は〈0001〉方向が最大, 〈11 $\bar{2}$ 0〉方向が最小である。
2. (01 $\bar{1}$ 0), (11 $\bar{2}$ 0)面の動摩擦係数の異方性は温度によって異なり、-10°C以上では〈0001〉方向で動摩擦係数が最大, 〈11 $\bar{2}$ 0〉方向で最小であるが、-21°C以下では動摩擦係数の最大と最小の方向は逆転した。
3. (0001)面では動摩擦係数のすべり方位による異方性を検出できなかった。
4. (0001)面が摩擦面に対し傾斜している場合、傾斜角20°では(0001)面を順なでする方向の摩擦が小さく、逆なでする方向の摩擦が若干大きい。30°傾斜したものでは、順逆方向の摩

擦よりも(0001)面が表面と交叉する方向の摩擦が大きく、動摩擦係数の異方性は2倍にも達する。

5. (01 $\bar{1}0$), (11 $\bar{2}0$)面上での掘り起し強さは $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向で最大、 $\langle 0001 \rangle$ 方向で最小であり、この異方性は温度によって変わらない。
6. (01 $\bar{1}0$), (11 $\bar{2}0$)面上での摩擦痕幅と掘り起し強さの異方性は底面すべりの寄与の割合によって説明できる。 $\langle 0001 \rangle$ 方向ではすべり面が直交し、滑走体前方に伸びるすべり線がない。そのため ϕ は最大、 p は最小となる。 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向ではすべり面は滑走体前方に伸び大きな変形領域が形成される。このため ϕ が最小、 p が最大となる。
7. (01 $\bar{1}0$), (11 $\bar{2}0$)面上の動摩擦係数の異方性は摩擦痕幅の異方性 $\phi\langle 11\bar{2}0 \rangle/\phi\langle 0001 \rangle$ と掘り起し強さの異方性 $p\langle 11\bar{2}0 \rangle/p\langle 0001 \rangle$ のかねあい、 $(p\phi^3\langle 11\bar{2}0 \rangle)/(p\phi^3\langle 0001 \rangle)$ により説明される。 -10°C 以上では前者の異方性に μ_k が支配され、 -21°C 以下では後者の異方性に支配される。

本研究を進めるに当たり、有益な討論と助言をしていただいた低温科学研究所若浜五郎教授、黒岩大助教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bowden, F. P. and Tabor, D. 1950 The Friction and Lubrication of Solids II. Oxford, 544 pp.
- 2) 津谷裕子 1966 摩耗に対する組織と摩耗変質層の役割. 潤滑, **11**, 369-376.
- 3) Dyer, L. D. 1661 Rolling friction on single crystals of copper in the plastic range. *Acta Met.*, **9**, 928-936.
- 4) Baily, J. M. and Gwathmey, A. T. 1962 Friction and surface deformation during sliding on a single crystal of copper. *ASLE Trans.*, **5**, 45-56.
- 5) Barquins, M., Kennel, M. and Courtel, R. 1968 Comportement de monocristaux de cuivre sous l'action de contact d'un frotteur hemispherique. *Wear*, **11**, 87-110.
- 6) 田中久一郎・織田善教 1973 銅単結晶の摩擦と変形. 応用物理, **42**, 347-356.
- 7) Bowden, F. P. and Brooks, C. A. 1966 Frictional anisotropy in nonmetallic crystals. *Proc. Roy. Soc.*, **A 295**, 244-258.
- 8) 曾田範宗・佐藤準一 1974 銅およびアルミニウム単結晶の表面損傷の異方性(第2報). 日本機械学会論文集, **40**, 2381-2388.
- 9) 曾田範宗・佐藤準一 1976 銅およびアルミニウム単結晶の表面損傷の異方性(第3報). 日本機械学会論文集, **42**, 635-642.
- 10) Butkovich, T. R. 1954 Hardness of ice. *SIPRE Res. Rep.*, **11**, 12 pp.
- 11) Offenbacher, E. L. and Roselman, I. C. 1971 Hardness anisotropy of single crystal of ice Ih. *Nature Phys. Sci.*, **234**, 112-113.
- 12) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 I. 低温科学, **35**, 1-22.
- 13) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 II. 低温科学, **35**, 23-33.
- 14) Duwell, E. J. 1962 Friction and wear of single-crystal sapphire sliding on steel. *J. Appl. Phys.*, **33**, 2691-2698.

Summary

Although anisotropy in friction has been studied by many workers for non-metallic solids such as diamond and sapphire and for metal such as copper, few investigations have been conducted on anisotropy in friction of ice.

Anisotropy in friction coefficients on the virgin surface of ice was clarified as a function of sliding directions, by moving a slider radially every 5° or 10° on a test ice surface. The slider used was a tungsten carbide ball.

(1) Anisotropies in friction and track width on prism planes $(01\bar{1}0)$ and $(11\bar{2}0)$:

Figures 3 (a) and (b) respectively show the coefficient of kinetic friction μ_k and the track width ϕ against the angle θ from the direction $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ on $(01\bar{1}0)$ at -21°C . The values of μ_k attained the maximum in $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ and the minimum in $\langle 0001 \rangle$. In contrast with μ_k , the maximum of ϕ was observed in $\langle 0001 \rangle$ and the minimum in $\langle 11\bar{2}0 \rangle$.

This inverse relation found between μ_k and ϕ was, however, found reverse when an experiment was made at temperatures of -10°C and above (Figs. 2 (a) and (b)). Similar results were obtained on a prism plane $(11\bar{2}0)$ to those observed on $(01\bar{1}0)$.

(2) Friction on basal plane (0001) :

Marked anisotropy in μ_k was not observed on a basal plane; though a fairly strong fluctuation of friction force was observed in any sliding direction.

(3) Anisotropy in friction on inclined surfaces to (0001) :

Figure 9 shows anisotropies in μ_k and ϕ measured on the surface of ice cut diagonally against the basal plane. As seen in this figure, two maxima of μ_k appeared at 0° and 180° when a slider was moved in parallel with the basal plane, but two minima appeared around 120° and 260° when it was moved nearly perpendicular to the basal plane. Though values of μ_k significantly changed with sliding directions, a slight variation was observed in ϕ .

(4) Microscope observation of frictional tracks:

Figures 11 (a), (b) and (c) show photographs of terminal areas of frictional tracks produced by a slider on a prismatic surface at -21°C . Figure 11 (a) shows a deformed region on both sides of a track. These regions are composed of a number of slip lines which extended normal to the track; as a result ϕ becomes minimum. Figure 11 (b) shows a deformed bulge formed in front of a slider that was moved parallel to the basal plane. When it is moved in this direction, a comparatively higher value of μ_k may be obtained because of formation of a bulge.

Next, ploughing strength p was calculated from the following equation.

$$p = (\mu_k W - k\pi\phi^2 s/4) 6R/k'\phi^3,$$

where, W is the load, s the interfacial shear strength, R the diameter of a slider, and k and k' shape factors of a contact area. Values of s are shown in Fig. 12. The occurrence of the maximum of the value of p in $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ may be understood by the bulge formed ahead of a slider, as shown in Fig. 10 (b).

Anisotropy in μ_k on the prism surface of ice can be explained in terms of anisotropies of p and ϕ . The frictional anisotropy $\mu_k \langle 11\bar{2}0 \rangle / \mu_k \langle 0001 \rangle$ may be proportional to $(p \langle 11\bar{2}0 \rangle / p \langle 0001 \rangle) (\phi \langle 11\bar{2}0 \rangle / \phi \langle 0001 \rangle)^3$. These values, which are summarized for various temperatures in Table 1, agree well with the experimental results. Anisotropy in friction can, therefore, be well explained by anisotropies in both p and ϕ .