HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	単結晶氷の摩擦に関する研究　II ： 滑走体の寸法効果および界面剪断強度と掘り起し強さの温度、速度、荷重依存
Author(s)	対馬, 勝年
Citation	低温科學. 物理篇, 35, 23-33
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18324
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p23-33.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Katutosi TUSIMA 1977 Studies of Friction on Single Crystals of Ice II—Size Effect of Slider and Temperature, Velocity and Load Dependencies on Interfacial Shear Strength and Ploughing Strength. *Low Temperature Science, Ser.* ***A, 35.*** (With English Summary p. 32)

単結晶氷の摩擦に関する研究 II*

―― 滑走体の寸法効果および界面剪断強さと掘り起し強さの温度，速度，荷重依存 ――

対馬勝年
(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. 序　　論

氷の表面を鋼球で摩擦する場合，動摩擦係数 μ_k は荷重，速度，温度，鋼球の直径および氷表面の結晶学的配位に強く依存する[1),2)] ことを前報[3)] (本研究 I) で述べた。

本研究 II では鋼球を 1 cm/s 以下の低速度で氷面に摩擦した。したがって，滑走体と氷面との摩擦によって氷の一部が融けてできる潤滑剤としての水の量はほとんど無視できると考えられた。また，氷面には鋼球の掘り起しによって通例観察可能な深い摩擦痕がつくられた。この二つは氷の摩擦係数を大きくする方向に作用するはずであるが，実測値は他の材料の摩擦係数にくらべはるかに小さい値を示した。この事実を説明するため著者は滑走体と氷面は凝着しており，観測された氷の低い摩擦係数の値は剪断を受けている氷内部の固有の低い剪断強さによると考えた。

Butkovich[4)], Barnes ら[5)] の氷のブリネルかたさ，Offenbacher ら[5)] の微小かたさの測定によると，氷のかたさ H は $-10°C$ で 500～1000 kg/cm^2 (押し込み 1～15 秒) であり，一方同じ温度での氷の剪断強さ s は Finlayson[7)] (7～8 kg/cm^2), Butkovich[8)] (11～15 kg/cm^2), 対馬ら[10)] [22 kg/cm^2 (底面に平行), 33 kg/cm^2 (底面に垂直)] なので，p の 1/50～1/100 の小さな値である。氷の剪断強さがこのように小さい理由としては，$-10°C$ 程度の温度は氷の融点に非常に近いことおよび氷の脆性などが挙げられるであろう。

元来，非常に小さな s/p 値をもつ氷では，その低摩擦を凝着説で十分説明できる[2),10)] のであり，摩擦面に水膜や液状膜等の特殊の膜の介在を仮定することは必らずしも必要ではない。

鋼球のようなかたい滑走体が氷のようにかたさと剪断強さの著しく異る表面を摩擦する場合，より重要な因子は鋼球のめり込みによる氷面の掘り起し効果である。掘り起し抵抗は荷重が一定であっても，鋼球の半径に逆比例すると考えられるから，ある場合には，この効果が剪断抵抗を上回る可能性がある。

本報では，滑走体としての鋼球の直径をいろいろに変えたときの摩擦 (鋼球の寸法効果) が氷面の結晶学的配位，速度，温度によって如何に変化するかについて述べ，これらの実験か

* 北海道大学低温科学研究所業績　第 1860 号

ら鋼球が氷面に凝着しているとした場合の剪断強さ s と氷面の掘り起し強さ p を実験的に決定する。

凝着説によると摩擦抵抗 F は主として剪断抵抗 F_s と掘り起し抵抗 F_p によってあらわされるが，この他に鋼球が氷面につくる摩擦痕に沿って再結晶，クラック，すべり線，小傾角境界等を形成するための抵抗 $F_{ext.}$ がある[11),12)]。

$$F = F_s + F_p + F_{ext.} \tag{1}$$

$$F_s = A \cdot s, \qquad F_p = A^* \cdot p \tag{2}$$

ただし，A は真実接触面積，A^* は掘り起しの断面積，s は剪断強さ，p は掘り起し強さである。

$F_{ext.}$ の定量的測定は大変難しいので，本論では $F_{ext.}$ は F_p, F_s に含まれるものとして議論を進めることにする。つまり，

$$F = F_s + F_p \tag{3}$$

鋼球は氷にくらべ十分かたいので，変形は氷の側だけで生ずると考えてよい。そうすると A, A^* は近似的に次式で与えられる[11)]。

$$\left.\begin{aligned} A &= (1/4)\, k\pi\phi^2 \\ A^* &= \phi^3/6R \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

ただし，k は接触面の形状因子をあらわす定数，ϕ は摩擦痕の幅，R は滑走体の直径である。

次に，p, s を求める方法を考えよう。(2) と (4) 式から，F_p は鋼球の径 R に逆比例し，F_s は R に無関係になる。もし R を変えることによって，

$$F_s \gg F_p \tag{5}$$

または

$$F_p \gg F_s \tag{6}$$

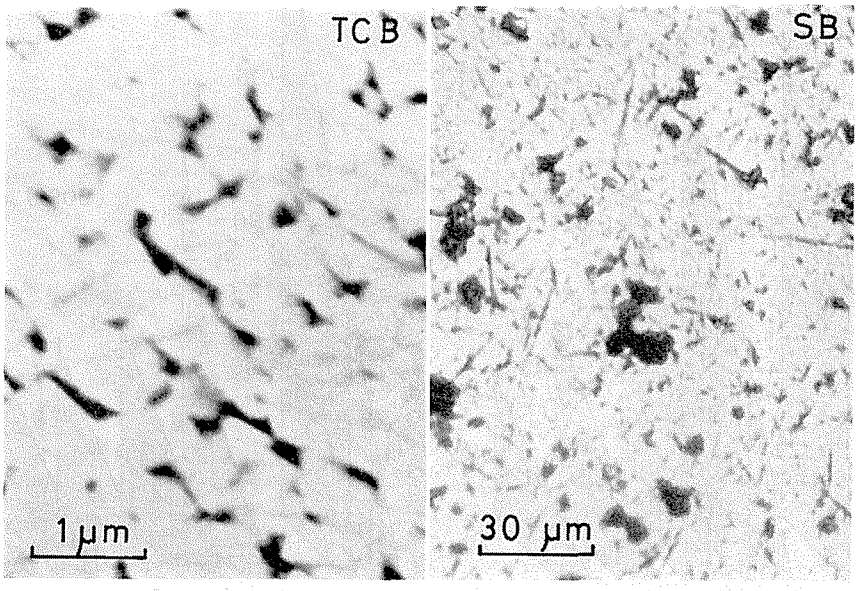
とできれば，純粋の剪断または純粋の掘り起しに近い摩擦の測定が可能になるはずである。実際 R の小さいもの (R=1.6 mm) を用いた実験では，$F_p/F_s \approx 10$ 程度になるので，掘り起しに関してはかなり純粋に近いものを実現できる。しかし，R を大きくして純粋の剪断に近い摩擦を行わせようとすると，摩擦痕が不鮮明となって真実接触面の決定ができず，この方法で剪断強さ s を求めることは断念せねばならなかった。

そこで，R をいろいろに変えた実験曲線を R_∞ (無限大) へ外挿することによって $F_s(=A \cdot s)$ を求め，次に差 $(F-F_s)$ を $F_p(=A^*p)$ に等しいとおくことにより，s, p の値を求めることにした。

II. 実験方法および試料

実験装置および実験の方法は前報[3)] と同じである。ただし，滑走体としては鋼鉄球の代りに直径 1.6 mm から 12.6 mm までのタングステンカーバイド球 (米国ウルトラスフェリックス

社製）を用いた。第1図にタングステンカーバイド球（以後 TC 球と呼ぶ）および前回使用の鋼鉄球の摩擦面の写真を示した。TC 球では鋼球上に見られる線状のキズが見られない。TC 球の表面粗さは9ミクロン以内である。



第1図 滑走体の摩擦面
左は今回使用のタングステンカーバイド（TC）球，右は前回使用の鋼鉄球

氷の試料にはアラスカ氷河産の巨大単結晶を用いた。この氷から，二つの結晶片を切り出し，$(01\bar{1}0)$ 面および (0001) 面が摩擦面となるように接合させて作った人工的双結晶氷と TC 球との摩擦を行った。TC 球を氷の上にのせ，氷を動かす。1回の摩擦毎に試料を平行移動させ，常に新しい面の摩擦を行った。

摩擦速度 V を 1.2×10^{-4} cm/s から 0.18 cm/s，温度 T を -1°C から -30°C まで変え，滑走体の直径 R を 1.6 から 12.6 mm まで変えて動摩擦係数 μ_k と摩擦痕幅 ϕ を測定した。

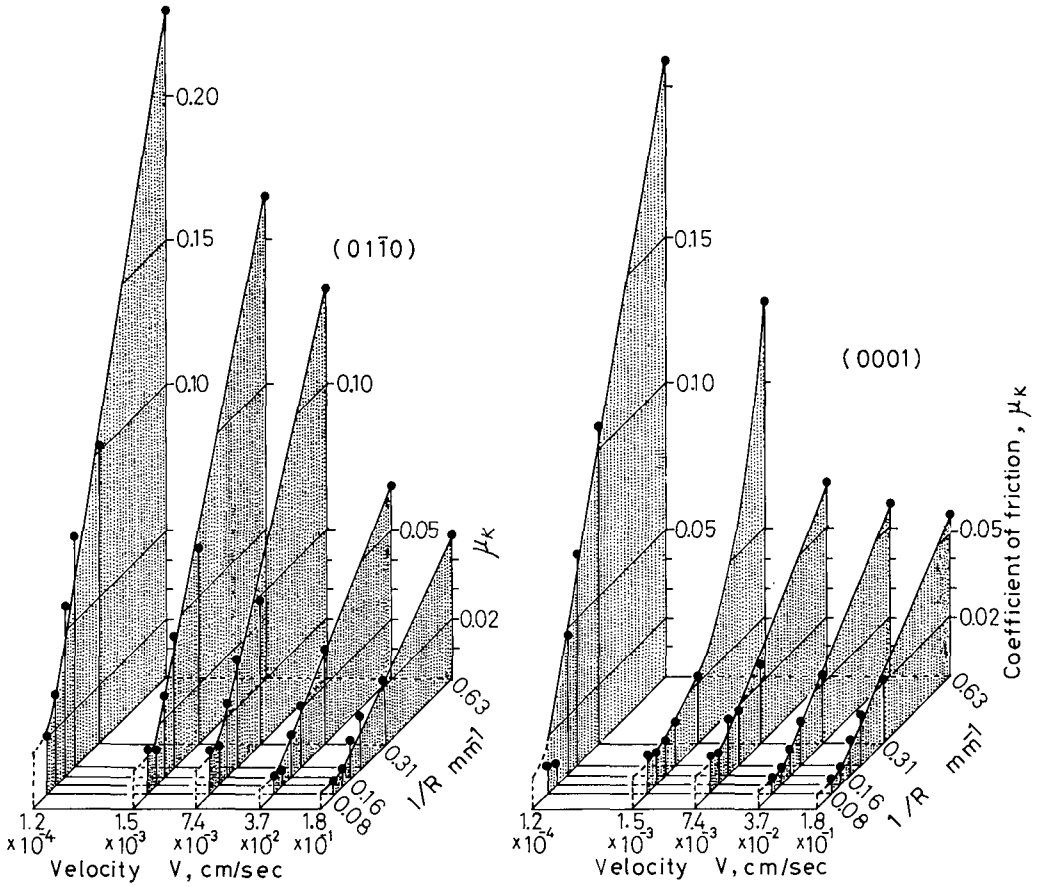
旋盤で削った直後の試料表面にはらせん状の削りあとが生じた。しかし，この試料を -2〜-3°C の温度で2時間程度アニールすると削りあとが殆んど完全に消失した。この氷を摩擦装置のおかれた低温室に移動する。氷の表面は空気に露出しているので，この移動により大きな温度差を受けるが，この単純な操作により -30°C という低い温度まで，光沢のある氷面と，再現性のよい実験結果を得ることができた。

III. 結　　果

1. μ_k-$1/R$-V 図表

第2図に温度 T を -10°C，荷重 W を 475 g，として，速度 V と滑走体の径 R を変えたときの動摩擦係数 μ_k の実測値を3次元図表で示した。

μ_k は R の小さいほど，また V の小さいほど大きい。$R=9.5$ mm $(1/R=0.11)$ 以下では μ_k



第2図 μ_k-$1/R$-V 図 表

左図は(01$\bar{1}$0)面，右図は(0001)面。温度 −10°C，荷重 475 g

は $1/R$ に比例し，R が小さいほど掘り起し効果が大きいことを示している。$R=9.5$ mm 以上では μ_k はほぼ一定値となった。これは R が大きいほど掘り起し効果が減るからである。この傾向は(01$\bar{1}$0)面および(0001)面の両者の摩擦に当てはまるが，μ_k の絶対値は(0001)面の方が(01$\bar{1}$0)面より小さい。

(0001)面の場合，一番遅い $V=1.2\times10^{-4}$ cm/s のとき μ_k が非常に大きくなって，(01$\bar{1}$0)面の μ_k と大差なくなった。このような低速のすべりでは氷のクリープによる滑走体のめり込みが大きくなり，摩擦痕上には母結晶とは分子配列を異にする多くの微結晶が発生するため，純粋の結晶面上の摩擦とは言えなくなる。そのため結晶面による μ_k の差が消失したものと思われる。

第2図で $1/R\to0$ ($R\to\infty$) へ外挿した μ_k の値は純粋剪断の摩擦と見なすことができる。そのようにして求めた剪断強さ s の速度特性を第1表に示した。s の速度による違いは大きくはないが，(01$\bar{1}$0)面上の s は(0001)面上のものより4割ほど大きくなっている。

(4) 式で与えられる真実接触面積 A の計算に当って，形状因子 k を(01$\bar{1}$0)面で0.8，(0001)面で1.0とした。k は滑走球と氷との真実接触面の形状がどの程度まで円形に近いかを面積比

であらわしたものである。本装置では金属球と氷との間の接触面を直接観察することができなかった。そこで，半球状ガラス滑走体を用い，滑走中の氷との真実接触面を顕微鏡写真にとって形状因子 k を定めた。

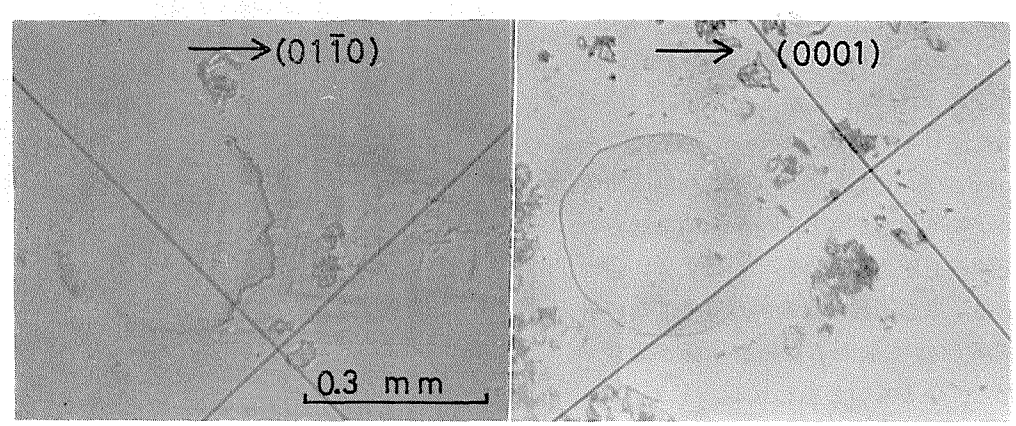
第1表 剪断強さ s の速度依存

タングステンカーバイド球と氷の摩擦。温度 −10°C，荷重 475 g，摩擦係数 μ_∞ は μ-$1/R$-V 図表で $1/R\to 0$ への外挿値，R 無限大における摩擦痕の幅 ϕ_∞ は $R=9.5$ および 12.6 mm の ϕ からの推定値，形状因子は $(01\bar{1}0)$ 面で $k=0.8$，(0001) 面で $k=1$ とした。

結晶面	速度 (V, cm/s)	摩擦係数 (μ_∞)	摩擦痕幅 (ϕ_∞, mm)	接触面積 (A, mm²)	摩擦力 (F, g-wt)	剪断強さ (s, g/mm²)
$(01\bar{1}0)$	0.18	0.005	0.28	0.049	2.38	48.5
	3.7×10^{-2}	0.006	0.30	0.057	2.85	50.5
	7.4×10^{-3}	0.013	0.33	0.068	4.75	69.9
	1.5×10^{-3}	0.017	0.42	0.111	8.08	72.7
	1.2×10^{-4}	0.018	0.57	0.204	8.55	41.9 $\bar{s}_p=54.6$
(0001)	0.18	0.004	0.28	0.062	1.90	30.9
	3.7×10^{-2}	0.005	0.30	0.071	2.38	33.6
	7.4×10^{-3}	0.006	0.31	0.075	2.85	37.8
	1.5×10^{-3}	0.009	0.39	0.119	4.28	35.8
	1.2×10^{-4}	0.010	0.43	0.145	4.75	32.7 $\bar{s}_b=34.2$

氷は蒸気圧が高いため操作中にガラスの表面が曇ったり，摩擦過程で生ずる削り粉の付着，滑走体の曲率半径 (3.2 mm) の小さいことなどのため，真実接触面の観観が容易でなかった。そこで，今回は氷表面にシリコンオイルを塗ってガラス面の曇りを防止した。この場合，滑走体と氷面の間に油膜が介在することにより，F_s は変るが，油膜が薄ければ真実接触面の幾何学的形状による影響は小さいと考えられる。

第3図は滑走中の摩擦面の写真である。(0001) 面上では真実接触面は円形をしているが，



第3図 真実接触面の形状

シリコンオイルを塗った氷面 (矢印方向に移動) とガラス半球 (固定) の摩擦。
$T=-10$°C, $V=7.4\times10^{-3}$ cm/s, $W=475$ g。左：$(01\bar{1}0)$，右：(0001)

第2表 掘り起し強さ p の速度依存

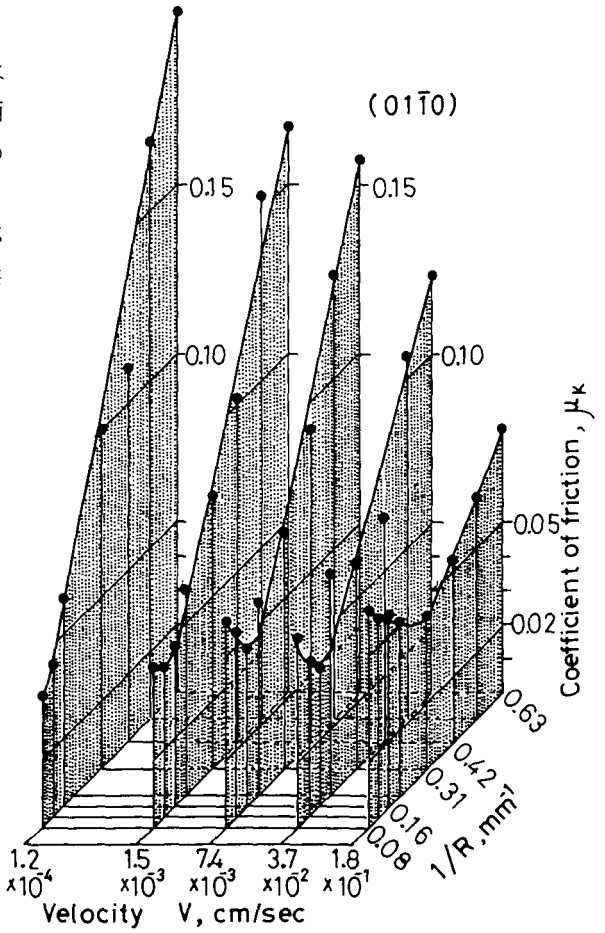
温度 −10°C, 荷重 475 g-wt, 滑走体直径 1.6 mm. $s_p=54.6$ g/mm², $s_b=34.2$ g/mm² とした。

結晶面	速度 (V, cm/s)	摩擦抵抗 (F, g-wt)	摩擦痕幅 (ϕ, mm)	接触面積 (A, mm²)	剪断抵抗 (F_s, g-wt)	掘り起し抵抗 (F_p, g-wt)	掘り起し断面積 (A^*, mm²)	掘り起し強さ (p, g/mm²)
	0.18	23.8	0.29	0.053	2.56	21.3	0.0025	8.7×10^3
	3.7×10^{-2}	31.4	0.31	0.060	3.02	28.4	0.0031	7.9×10^3
$(01\bar{1}0)$	7.4×10^{-3}	63.7	0.41	0.106	7.38	56.3	0.0072	7.7×10^3
	1.5×10^{-3}	78.9	0.48	0.144	10.4	68.5	0.0113	6.1×10^3
	1.2×10^{-4}	108	0.75	0.350	14.7	93.3	0.0439	2.2×10^3
	0.18	26.1	0.31	0.075	2.56	23.5	0.0031	7.6×10^3
	3.7×10^{-2}	27.1	0.31	0.075	2.56	24.5	0.0031	7.9×10^3
(0001)	7.4×10^{-3}	31.7	0.34	0.091	3.11	28.6	0.0041	7.0×10^3
	1.5×10^{-3}	60.8	0.48	0.181	6.19	54.6	0.0115	4.7×10^3
	1.2×10^{-4}	95.5	0.75	0.442	15.1	80.4	0.0439	1.9×16^3

$(01\bar{1}0)$ 面上では接触面の後方が円形から大きくずれている。

一般に，摩擦痕幅は $(01\bar{1}0)$ 面上では明瞭に判別されるのであるが，(0001) 面上では R が大きい場合まれに摩擦痕の判別できないことがあった。R が小さくなると氷の摩擦面に再結晶やクラックが発生するが，これらは (0001) 面よりは摩擦の大きい $(01\bar{1}0)$ 面上で顕著であった。

次に，各速度における掘り起し強さ p を求めよう。上に求めた s を用いて，$(F-A\cdot s)$ を計算し，その値を摩擦痕の断面積 A^* で割った値が p になる。第2表では F, ϕ, $A\cdot s$, A^*, p の値をいろいろの速度 V に対して示した。$(01\bar{1}0)$ 面の場合，$V=7.4\times10^{-3}$ cm/s で p は 7.7 kg/mm² であり，これに対応する接触時間でのブリネルかたさ 6.8 kg/mm² (接触面の平均垂直圧力) よりわずかに大きい値である。摩擦過程では動的な塑性変形の抵抗が余分に加わるため p の値が大きくなっているものと思われる。V が 1.2×10^{-4} cm/s と 60 分の 1 に減少すると p の値は 4 分の 1 の 2 kg/mm² となった。(0001) 面上で p の値は $(01\bar{1}0)$ 面上のもの



第4図 −30°C での μ_k-$1/R$-V 図表
$(01\bar{1}0)$ 面, 荷重 475 g

にくらべ1割ほど小さいが，両者とも V の減少につれて p の値も小さくなった。

μ_k-$1/R$-V 図表を，$-10°C$ 以外の $-5°$，$-20°$，$-30°C$ の各温度について作成してみると，$-5°C$ と $-10°C$ の図表の間には殆んど差はないが，$-20°$ および $-30°$ と $-10°C$ との図表の間には大きな違いがある。特に，$-30°C$ では R の大きい領域で μ_k の値は数倍に増大するにも拘らず，R の小さい領域では $-10°C$ のときと同程度の μ_k を示した。第4図に比較のため $-30°C$ での $(01\bar{1}0)$ 面についての μ_k-$1/R$-V 図表を示した。

第3図において，μ_k が $1/R$ に対し直線的に増加している部分，および $1/R$ が一定の μ_k-V 曲線で μ_k が V の減少とともに増加する部分は掘り起し効果が支配的であることを示している。図から各直線部分は V に関係なくお互い平行な直線となっている。この関係は，p と摩擦痕の幅 ϕ を用いて，

$$\phi^3 \cdot p = 一定 \qquad (7)$$

とあらわすことができる。

V が小さくなると，氷のクリープのため ϕ は増大するけれども，逆に塑性変形の圧力 p も減少するわけである。この関係は掘り起し仕事が速度に無関係であると言い換えることもできる。

第4図は $-30°C$ における μ_k-$1/R$-V 図表であるが第3図にくらべ異る点は V が大きくて $1/R$ の小さい場合 μ_k の直線関係からの偏倚である。この偏倚は，$1/R$ の小さい領域では，ϕ が R の増大とともに広がるとして説明できる。

2. μ_k-$1/R$-T 図表

荷重と速度を一定にして，温度 T と球径 R を変えたときの $(01\bar{1}0)$ 面についての μ_k の変化を第5図に示した。どの温度でも R が小さいほど μ_k は大きい。この R の減少による μ_k の増大は，R の減少が摩擦痕の断面積 A^* を増加させること，したがって，掘り起し抵抗の増大によると考えられる。

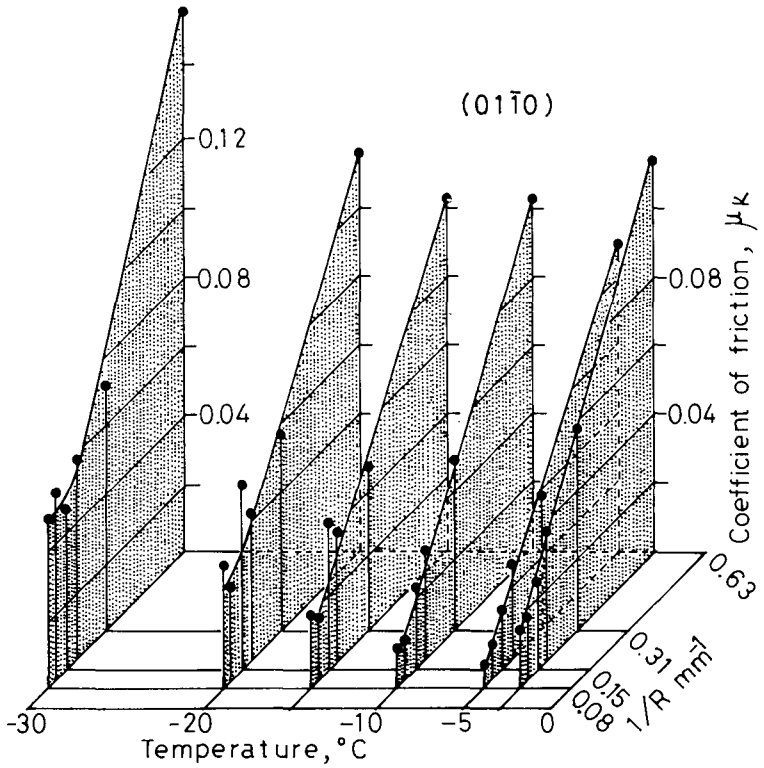
第5図にみられるように，温度に関しては $-5°C$ 付近に μ_k の極小値があって，これより低い温度でもまた高い温度でも摩擦は増大した。

低温域で μ_k が増すのは，s や p の増大が接触面積の減少効果を上回るためである。一方，高温域での摩擦の増大はクリープによる接触面積や掘り起し面積の増大の方が s や p の減少より大きいためと考えられる。

第1，2表と同様の方法で s および p の温度依存を求めたのが第3表である。$(01\bar{1}0)$ 面についてみると，s は $-1°C$ の $0.012\ kg/mm^2$ から $-30°C$ では40倍の $0.48\ kg/mm^2$ に増大した。一方，p は $-1°C$ の $0.71\ kg/mm^2$ から $-30°C$ では4倍の $29\ kg/mm^2$ となった。(0001) 面でも同様の傾向にあるが，強さの絶対値は $(01\bar{1}0)$ 面より幾分小さい。

以上求めてきた剪断強さ s の値を付着実験あるいは他の摩擦実験から求めた値と比較してみると，Raraty-Tabor[13] や Jellinek[14] の付着実験の値にはかなり近いが，Bowden-Tabor[15] の摩擦実験の値にくらべると著しく小さい。

かたい球面滑走体を氷の上に滑らせると，真実接触面積の測定が容易になるという利点はあるが，その反面滑走体による掘り起しが介在するため，純粋の剪断強さを求めることができ



第5図 μ_K-$1/R$-T 図表
(01$\bar{1}$0)面，荷重：269～475 g，速度：7.4×10^{-3} m/s

第3表 剪断強さ s および掘り起し強さ p の温度依存，
速度 7.4×10^{-3} cm/s，荷重 269～475 g-wt

結晶面	温度 (°C)	−1°	−3°	−5°	−10°	−20°	−30°
(01$\bar{1}$0)	s, kg/mm^2	0.012	0.015	0.035	0.070	0.24	0.48
	p, kg/mm^2	0.71	1.8	3.2	8.7	11.3	29.2
(0001)	s, kg/mm^2	0.005	0.012	0.017	0.040	0.12	0.34
	p, kg/mm^2	0.56	1.9	3.7	7.0	14.6	18.3

ない。議論の項で述べるように Bowden ら[15] の実験では掘り起し項が考慮されていないことが，s を異常に大きくした原因と考えられる。なお，摩擦から求めた s は付着から求めたものにくらべ温度依存が強い。

3. 氷球と真ちゅう板の摩擦

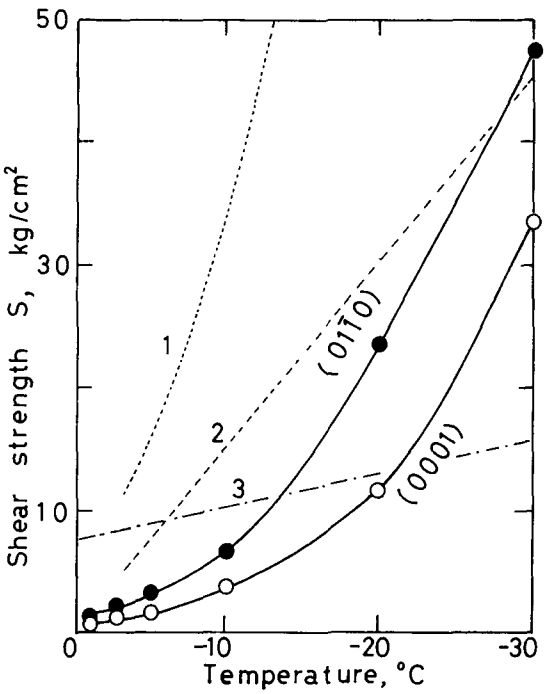
次に純粋剪断の摩擦の試みとして，単結晶氷で直径 6.4 mm の半球を作り（摩擦面 (0001)），真ちゅう板上に滑らせた。荷重 269 g，速度 7.4×10^{-3} cm/s としたとき，−7°C では氷球の先端に $A=0.14$ mm^2 の平らな円形部分ができ，摩擦力 F は 4.3 g であった。これから計算すると界面剪断強さ s は 0.03 kg/mm^2 となる。−20°C では $A=0.1$ mm^2，$F=12$ g，で $s=0.12$ kg/mm^2

であった。これらの値は本実験で求めた s にほぼ等しい。なお，氷球と金属板の摩擦については別報で述べる予定である。

IV. 議　　論

Bowden-Tabor の著書[15]に，鋼鉄球やテフロン球等と氷との摩擦から求めた剪断強さが紹介されている。この結果は Bowden ら[16]が主張する氷の摩擦融解説の根拠をなすものとして重要な意味をもっている。しかし，この実験には問題があると思われるので，本実験の結果をもとに詳しい検討を加えることにする。

彼等は鋼球に 2.5kg の荷重をかけ氷の平板上に低速度で滑らせた。摩擦抵抗は荷重に比例し，摩擦痕は数珠状のスティック・スリップ模様であった。摩擦係数は −5°C で 0.04 であったが，温度の低下とともに直線的に増大し −30°C で 0.23 となった。その値（第 6 図）は本報での測定値および氷の剪断強さ（対馬ら[9]，Butkovich[8]）や氷とステンレス間の付着実験（Raraty-Tabor）[13]から得られた値にくらべ非常に大きい。第 6 図にはこれらの値をグラフで示した。



第 6 図　剪断強さの温度依存
黒丸は (01$\bar{1}$0) 面，白丸は (0001) 面の剪断強さ，摩擦速度 7.4×10^{-3} cm/s，荷重 269～475 g，破線の **1** は Bowden-Tabor[15]，**2** は Raraty-Tabor[13]，**3** は Butkovich[8]

Bowden らがどの程度の大きさの鋼球を用いたかは明らかでないが，生じた摩擦痕の幅は 1 mm 程度であったという。その後，彼等の研究室で Barnes-Tabor が氷のかたさの測定に直径 50 mm の鋼球を使用していることから推察して，直径 10 mm 程度の滑走体を用いたものと思われる。

今，仮に $R=10$ mm として，接触面積 A と掘り起し面積 A^* を計算すると，0.78 mm² および 0.017 mm² となり，その比はわずか 46 にすぎない。金属の場合ならともかく，氷の場合は $p\approx100s$ であるから，掘り起しによる抵抗は摩擦のかなりの部分を占めるはずである。

したがって，Bowden らが求めた剪断強さが大変大きいのは，掘り起しに対する抵抗を含んでいることによると考えられる。

同様の議論はテフロン球と氷の摩擦から求めた剪断強さが，付着実験の値より異常に大きいことに対してもなり立つであろう。

彼等は，テフロン球と氷との真実接触面積の推定に氷のブリネルかたさの値を用い，接触

面でテフロン球がつぶれ真実接触面積の拡大することを考慮していない。この面積の補正を行えば，テフロンと氷の界面剪断強さはかなり小さくなるはずである。

V. まとめ

いろいろの大きさの直径 R をもつタングステンカーバイド球と氷平板の摩擦を速度 V，温度 T の関数として測定し，μ_k–$1/R$–V，μ_k–$1/R$–T の各3次元図表（第2，4，5図）を作った。それらの結果から，剪断強さと掘り起し強さの速度依存，温度依存を求めた（第2，3表，第6図）。

動摩擦係数 μ_k は R の小さいほど，また V の小さいほど大きく，温度を変えてゆくと μ_k の極小が現われた。掘り起し強さ p は剪断強さ s の100倍程度大きく，p および s の値は(0001)面より(01$\bar{1}$0)面の方が大きかった。

終りに，本実験を遂行するにあたり御指導と御助言をいただいた低温科学研究所若浜五郎教授，黒岩大助教授，機械技術研究所津谷裕子氏に深く感謝の意を表します。

文献

1) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦 (1). 潤滑, **22**, 514–521.
2) Tusima, K. 1977 Friction of a steel ball on a single crystal of ice. *J. Glaciol.*, **19**, 印刷中.
3) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 I. 低温科学, 物理篇, **35**, 1–22.
4) Butkovich, T. R. 1954 Hardness of ice. *SIPRE Res. Rep.*, **9**, 12 pp.
5) Barnes, P. and Tabor, D. 1966 Plastic flow and pressure melting in the deformation in ice I. *Nature*, **210**, 878–882.
6) Offenbacher, E. L. and Roselman, I. C. 1971 Hardness anisotropy of single crystal of ice Ih. *Nature, Phys. Sci.*, **234**, 112–113.
7) Finlayson, J. N. 1927 Tests on the shearing strength of ice. *Can. Engineer*, **53**, 101–103.
8) Butkovich, T. R. 1954 Ultimate strength of ice. *SIPRE Res. Rep.*, **11**, 12 pp.
9) 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.
10) 対馬勝年 1975 氷の摩擦機構について. 潤滑, **21**, 287–294.
11) バウデン・テーバー著 (曽田範宗訳) 1961 固体の摩擦と潤滑. 丸善, 332 pp.
12) 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.
13) Raraty, L. E. and Tabor, D. 1958 The adhesion and strength properties of ice. *Proc. Roy. Soc.*, **A 245**, 184–201.
14) Jellinek, H. H. G. 1957 Tensile strength properties of ice adhesion to stainless steel. *CRREL Res. Rep.*, **23**, 22 pp.
15) Bowden, F. P. and Tabor, D. 1964 The friction and lubrication of solids II, Oxford, 544 pp.
16) Bowden, F. P. and Hughes, T. R. 1939 The mechanism of sliding on ice and snow. *Proc. Roy. Soc.*, **A 172**, 280–298.

Summary

As described in the previous paper I, it was found that the friction coefficient of ice depends on load, frictional velocity, temperature and crystallographic properties of the frictional surface of ice. In this experiment, a steel or tungsten carbide ball was slid over a flat surface of ice at very low speed (1.2×10^{-4} to 0.18 cm/s) to clarify the friction mechanism of ice.

The existence of melted water which may be produced by frictional heating can be ignored because of a very low frictional velocity. The author supposed that the low friction on ice can be explained by the intrinsic lower shear strength and very large hardness of ice itself, that is, by the adhesion theory.

According to the adhesion theory, friction coefficient μ_k is expressed by,

$$\mu_k = (A_1 s + A_2) p/W,$$

where A_1 is the contact area, A_2 the cross sectional area of a track, s the interfacial shear strength, p the ploughing strength and W the applied load. When a hard ball such as a tungsten carbide ball slides on a plate of ice, A_1 and A_2 are expressed by

$$A_1 = k\pi \frac{\phi^2}{4}, \qquad A_2 = k' \frac{\phi^3}{6R},$$

where ϕ is the frictional track width, R the diameter of a slider, k and k' shape factors of a contact area.

To find the interfacial shear strength s and ploughing strength p between the ice plate and the tungsten carbide ball as a slider, a series of experiments were carried out about the size effects of the slider (1.6 to 12.6 mm in diameter) on the friction of ice. As a result, values of s and p were determined as a function of velocity, temperature (-1 to -30°C) and crystallographic plane of the ice surface (0001) and $(01\bar{1}0)$.

Figures 2 (a) and (b) show the relation of μ_k to the inverse diameter of the slider $(1/R)$ and velocity (V) on both planes of (0001) and $(01\bar{1}0)$ at -10°C. The values of μ_k increased linearly with $1/R$ and with decreasing frictional velocity. When R was greater than 9.5 mm, the value of μ_k was nearly constant. If we may consider that these values of μ_k roughly correspond to pure shears, we can calculate the shear strength s. Therefore, the ploughing strength p can be determined.

To obtain the value of shape factor k, a real contact area was observed by the use of a hemispherical glass ball as a slider (Fig. 3). From these observations, the value of k was determined approximately 0.8 for $(01\bar{1}0)$ and 1.0 for (0001). It was assumd that k' equals 1; that is, a bulge in front of slider is ignored.

The values of s and p were calculated for different velocities on the basis of the results shown in Fig. 2. It was found that the value of s is independent of velocity, and the value of p decreases with decreasing velocity.

Figure 5 shows the relations among μ_k and the reciprocal of the diameter of a slider $(1/R)$ and temperature (T). It should be noted that the minimums friction were observed for curves of $\mu_k - T$ as mentioned in the previous paper. The temperature at which the minimums of friction were observed did not change with the size of a slider.

Figure 8 shows the temperature dependence of the values of s for (0001) and $(01\bar{1}0)$, in which values of s for $(01\bar{1}0)$ were greater than those for (0001), whereby these values of s increased with lowering temperature.

The temperature dependence of the values of s and p for both (0001) and $(01\bar{1}0)$ are summarized in Table 3. It should be noted that the values of p are approximately a hundred times larger than the values of s in any temperature. These facts are closely connected to the low friction on ice.