HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北極圏海氷調査　V：海氷と各種材料間の摩擦の測定
Author(s)	対馬, 勝年; 田畑, 忠司
Citation	低温科學. 物理篇, 37, 141-161
Issue Date	1979-03-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18379
Type	bulletin (article)
File Information	37_p141-161.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Katutosi TUSIMA and Tadashi TABATA 1978 Arctic Sea Ice Research. V. Measurements of Friction Between Sea Ice and other Materials. *Low Temperature Science, Ser. A, 37.* (With English Summary p. 160)

北極圏海氷調査 V*,**

——海氷と各種材料間の摩擦の測定——

対馬勝年・田畑忠司
(低温科学研究所)

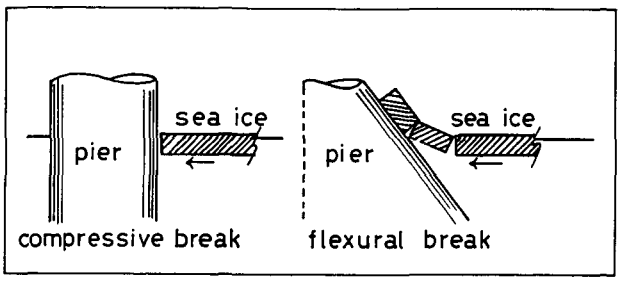
(昭和53年10月受理)

I. 序　論

現在日ソ共同開発事業の一環として進められている樺太沖海上からの石油掘削計画に関連して，海氷と橋脚との相互作用が問題となっている。樺太周辺の海域は12月から5月までの6カ月間を海氷でおおわれ(田畑[1])，その海氷は風，潮流，潮汐あるいは熱応力等の作用を受けて複雑な力を橋脚に及ぼすことが予想される。

このような橋脚等の構造物に及ぼす氷の作用は，海氷域における石油掘削塔に限らず，灯台，防氷堤あるいは厳冬地の河川にかかる橋脚，あとで述べる砕氷船等にとっても大きな問題となっている。灯台や石油掘削塔では円柱状杭より円錐状杭の方が海氷から受ける力を小さくできることが理論的に導かれ(Bercha and Danys[2])ていて，例えばカナダの灯台には円錐状杭が用いられている(Danys and Bercha[3])。

通常の円柱状杭では，杭は海氷の圧縮破壊力に相当する強大な力を受ける(圧縮破壊)ことになる(例えば，Swamidas *et al.*[4])のに対し，円錐または斜板状杭では海氷は自らの力で斜面をのぼり，登るにつれ海氷自体のたわみが増してやがて壊れてしまう(曲げ破壊)(第1図参照)。斜面と海氷との摩擦が小さければ小さいほど，海氷は容易に斜面を登り，簡単に壊れることになる。ここで問題となるのは，斜面材料やその表面状態，摩擦面に加わる圧力，速度，温度等によって海氷と斜面材料間の摩擦係数がどのような値をとるかということである。この摩擦には杭に凍着した海氷が動き始めるときの摩擦つまり静摩擦(又は付着)の問題と運動中の摩擦つまり動摩擦の問題があるが，本報では動摩擦だけを扱う。



第1図　円柱状橋脚(左)では海氷の圧縮破壊となり，円錐状橋脚(右)では曲げ破壊となる

海氷の摩擦はまた砕氷船や砕氷タンカーとも密接な関係にあって，船体が海氷との摩擦に

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1957号
** 北海道大学低温科学研究所　流氷研究施設研究報告　第72号

費すエネルギは砕氷エネルギに匹敵する（田畑[5]）ともいわれており，Marsh ら[6]によると海氷に対し摩擦の小さい塗料をぬった砕氷船や砕氷タンカーでは年間の燃料消費量を12%も節約できたという。特に船体の大きい砕氷タンカーでは海氷との摩擦エネルギを小さくすることが大きな問題となる。

以上のように海氷の摩擦が関与する問題は多く，各方面から摩擦のデータが要望されているのであるが，従来の海氷の摩擦に関する測定データは必らずしも十分とはいえない。例えば，Airaksinen[7]は鉄製の小型橇を海氷上に滑らせて，圧力が0.01から0.3 kgw/cm^{2}に増加するにつれ，動摩擦係数μ_kが減少すること，同じ鉄でも海水で腐食した鉄はサンドブラストした鉄の2倍のμ_k (0.25～0.2) をもつという結果を得た。Grothus and Spork[8]は鉄製の円錐を海氷にあけた円錐穴の中で回転させμ_k=0.24～0.12 (圧力0.5～3 kgw/cm^2) の値を得，Finke[9]は1～80 kgw/cm^{2}の高圧力下の摩擦でμ_kは圧力とともに増し0.04～0.07という値を得た。最近Schwarz and Weeks[10]は海氷の摩擦をレビューし，同じ鉄に対してもμ_kは0.03から0.25までいろいろの値が得られていること，実用面の重要性に反し測定データの不十分さを指摘している。

このように海氷の摩擦についてはいくつかの測定があるとはいうものの，材料が鉄に限られていたり，測定者により全く異った値がえられるという具合で，各種材料について一貫した測定データが要望される。本報の目的の一つは同一条件下において，いろいろの摩擦材料に対する海氷の動摩擦係数の値を提供することである。

前報で対馬[11]は純氷上に球面スライダーを滑らせ，摩擦抵抗は主としてスライダーと氷との分子間結合を剪断する抵抗およびスライダーが氷に溝を掘る溝掘り抵抗からなることを指摘した。その場合，スライダーのめり込みが10^{-3} cm程度のわずかなときでも溝掘り抵抗は剪断抵抗を上回った。一般の工業材料として使用される鉄，ステンレス等の金属面は10^{-3} cm程度の粗さはもっているので，表面粗さが摩擦抵抗を決める重要な因子の一つになると考えられる。

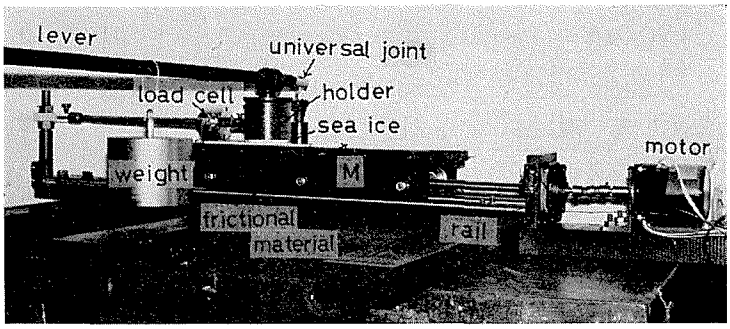
次に海氷の特異性は結氷点（−1.8°C）以下の温度でも氷体内に多量の塩溶液（ブライン）を含んでいる点にある。したがって，海氷は氷体内にブラインという潤滑油を内蔵した物質ということができる。昔，スキーやスケートの摩擦機構の議論において[12]，何等らの作用によって発生した水の潤滑作用によってスキーやスケートはよく滑るのだという考えがあった[13),14]。この場合には水の潤滑効果という問題の他に水の発生という問題があって，議論が難しかった。しかし，海氷の場合には潤滑の役を果すべきブラインがすでに実在しているのであるから，ブラインがどの程度の潤滑効果を果すかを調べるのに最適といえる。そして，海氷の摩擦は純氷の摩擦機構にも手がかりを与えるであろう。

本報の目的は，各種金属，プラスチックス，塗装材料と海氷および純氷との摩擦を荷重や速度を変えて調べ，石油掘削塔および船体材料としてどういうものが適当かの手がかりを与え，あわせて海氷の摩擦機構を明らかにすることである。

なお本報はアラスカ北端のバローにおいて1978年4月下旬に行った海氷の摩擦測定およびその後低温実験室で行った純氷，人工海氷の摩擦測定の結果である。

II.　実験装置および実験方法

第2図に実験装置の写真を示した。長さ1mの2本の丸棒レールが厚さ20mmの丈夫な鉄の板に固定されていて，レールの上を6個の車輪のついた台車が一定速度で左右に走る。台車は長さ50cm，幅12cmで，上面に同寸法の摩擦試験片がネジ止めされている。試験片の上に直径75mmの円柱状海氷試料がのっており，試料は上面から被せた鉄ふたに凍着されている。鉄ふた上面の突出部にテコを利用して11kgwから110kgwの垂直荷重が加えられる。テコに加えられたおもりは10kgwでテコをはずすと鉄ふたと海氷との自重1.3kgwとなる。海氷試料の底面積は44cm²なので接触面の圧力は0.03から2.5kgw/cm²まで変えられる。



第2図　摩擦測定装置

モータで駆動される台車(M)に摩擦試験片がネジ止めされている(写真では減速器をはずしている)。鉄ふたの中の海氷試料と試験片間の摩擦抵抗を荷重変換器で測る。鉄ふたの上からおもりをつけた棒により荷重が与えられる

台車はネジシャフトと減速器を介してシンクロナスモータで駆動され，減速器とモータをいろいろに組み合わせることにより台車の速度を5cm/sから3.5×10^{-5}cm/sまで変えた。使用したモータは日本サーボのシンクロナスモータで1,500 rpm, 60 rpm, 1 rpmの3種，減速器は協育歯車のウォームギア1/20, 1/100である。

台車に深さ2cmのアクリル製の水槽をとりつけると海水中での摩擦を行うこともできる。

摩擦装置の左端から水平に伸びる鉄棒の先端に荷重計(新興，LR 50 kg)が取りつけられていて，この荷重計の他端は海氷試料の入った鉄ふたにピンで連結されている。鉄棒はナットにより上下に移動固定できる。

試験片の動き始めの摩擦抵抗および滑走中の抵抗をペン書き記録計で連続記録した。

III.　試験片および海氷試料

1.　摩擦試験片

実験に使用した試験片は幅12cm，長さ50cm，厚さ3mmの平板で第1表にあげた金属，プラスチックス，塗装面，コーティング面の計20種である。

各試験片は中性洗剤，アルコール水溶液および流水で十分洗浄し，一部の試料についてはアセトンでの洗浄も行った。このアセトンでの洗浄の過程で鉄及びシリコロイの素面で表面の

第1表 摩擦試験片

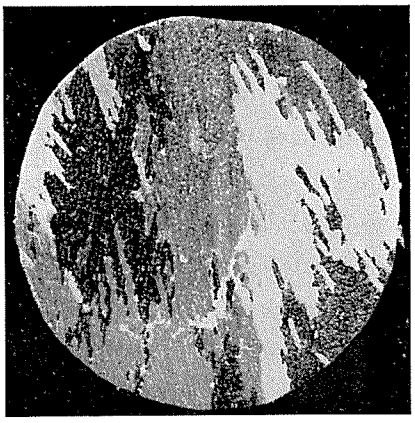
金属	ステンレス	1. 粗い面
		2. 平滑面
	鉄	3. 酸化被膜面（素面）
		4. 研磨面
	アルミニウム	5. 平滑面
	シリコロイ	6. 酸化被膜面（素面）
		7. 研磨面
	真ちゅう	8. 研磨面
プラスチックス	PTFE（テフロン）	9. なめらか
	PMMA（アクリル）	10. 平滑面
	PVC（塩化ビニール）	11. 平滑面
	PE（ポリエチレン）	12. 平滑面
	ガラス	13. 平滑面
塗装面・コーティング面	サビ止め塗装	14. 粗い面（母材鉄）
	エポタール	15. 粗い面（母材鉄）
	イナータ 160	16. 粗い面（母材鉄）
	ND-4 X（ポリテトラフルオロエチレン―ヘキサフルオロプロピレン共重合体）	17. 平滑面（母材ミニアウルム）
	アドロン（パーフロロアルコキシ樹脂）	18. 平滑面（母材ミニアウルム）
	FS 5109 BK（ポリテトラフルオロエチレン樹脂，黒色）	19. 平滑面（母材ミニアウルム）
	F 2035 BK（ポリフェニルサルファイド樹脂）	20. 粗い面（母材ミニアウルム）

酸化被膜が部分的に剝離した。それでこれらの材料については酸化被膜面（素面）とおよび4/0エメリーペーパーで被膜を除去した面（研磨面）を用意した。洗浄後の試験片は自然乾燥させたのちサランラップで包装した。

ステンレスは18 8（Cr 18%, Ni 8%）ステンレススチールであり，シリコロイは鉄を母材に5%の珪素を含有させて強靱性を増したものである。エポタール，イナータ160（ヘルシンキのTeknos Maalit 社製）は試験片の長さが28 cmと短かかったので摩擦速度0.2 cm/s以下のテストにだけ使用した。

2. 海氷試料および氷試料

実験に使用した海氷試料はバローの北極研究所（Naval Arctic Research Laboratory）の空港入口近くにある平坦な海氷面から採取した。海氷表面には場所によって異なるが2 cmから30 cmの硬い雪があり，その下に約10 cmのゆき氷の層があって以下160 cmまで凍結氷が続いていた。納口ら[15]はこの海氷面の海氷の圧縮強度を測定し，アラスカ大学のShapiroらはフラットジャッキによる表層付近の海氷の圧縮強度の測定を行っていた（鉛直にあけた海氷コアの塩分濃度分布および結晶構造については北極圏海氷調査IV[15]を参照されたい）。直径75 mmのアイスオーガーで掘り出した海氷コアのうち比較的気泡の少ない，表面から60ないし65 cmの部分が摩擦面となるように切り出した。試料の片面を鉄ふたに挿入し凍着させたのち，もう一方の面を高速ダイヤモンドカッターで切り，さらにカンナで仕上げて摩擦試料と



第3図　海氷の試料の薄片写真
水平断面，バロー

した。試料の薄片写真を第3図に示した。試験片を変える毎に海氷の摩擦面をカンナで削り，常に新しい面から摩擦を開始した。

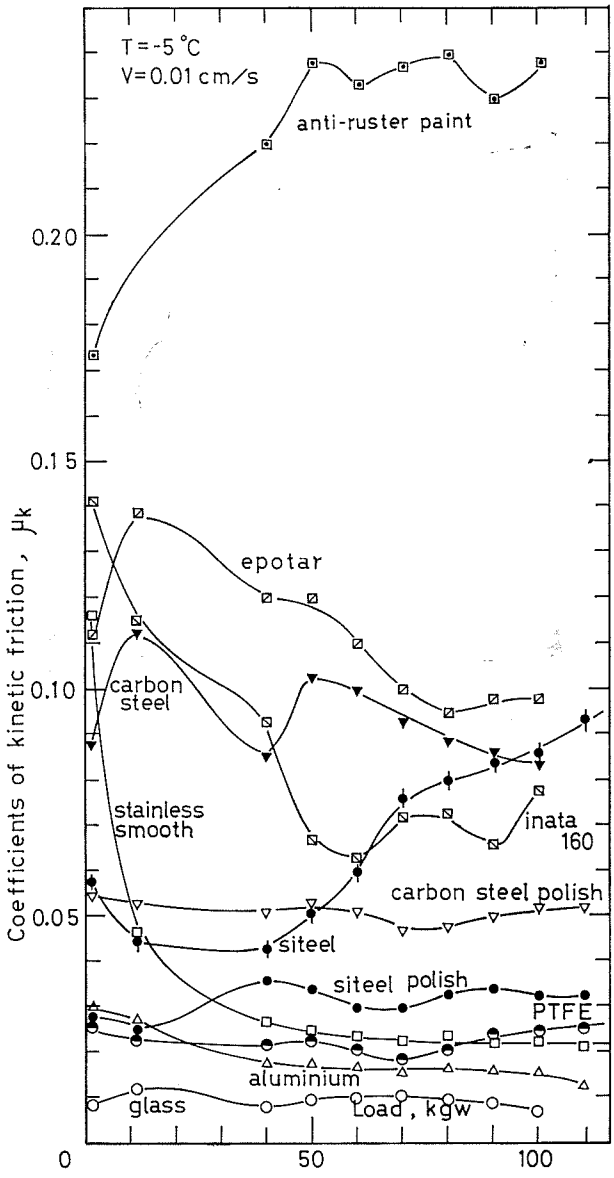
上に述べたバローの海氷の他に低温実験室では市販氷および人工海氷を用いて摩擦の測定を行った。これらの氷は実験の都度表面を旋盤で平らに削った。

IV. 実験結果

最初にバローにおける海氷の摩擦の測定結果を述べ，次に低温実験室で行った純氷及び人工海氷の摩擦を述べる。

1. バローにおける海氷の摩擦

試料の摩擦面はすでに述べたように，ボーリングコアから切り出した比較的かたく気泡の少ない深さ60～65 cmの海氷の水平断面である。ブライン細胞は海氷の成長方向つまり摩擦面に垂直方向に伸びていて，以下に述べるどの条件下においても摩擦面に浸み出したブラインは試験片全面をぬらした。実験温度は主として −5°C であったが，ブラインの潤滑効果や摩擦機構の手がかりをえるために −10°C と水槽中でも若干の測定を行った。

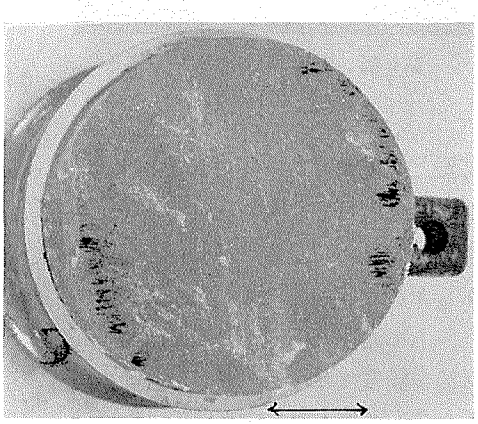


第4図　荷重効果
速度 0.01 cm/s，温度 −5°C，縦軸は動摩擦係数，横軸は荷重（バローの海氷）。(⊡：サビ止め塗装，⊠：エポタール，▼：鉄（素面），⊠：イナータ 160，⧫：シリコロイ（素面），▽：鉄（研磨面），●：シリコロイ（研磨面），□：ステンレス（平滑面），◓：PTFE，△：アルミニウム，○：ガラス）

a) −5°C での摩擦

第4図に速度を 0.01 cm/s，荷重を 1.3 kgw から 100 kgw まで増していったときの動摩擦係数 μ_k の測定値を示した。スティック・スリップの場合を除くと滑走中の摩擦曲線の変動は小さく，各値は一回の往復摩擦の平均値で示した。μ_k は摩擦材料により著しく異なり，ガラスの 0.009 からサビ止め塗料を塗った面の 0.24 まで広範囲の値をとった。

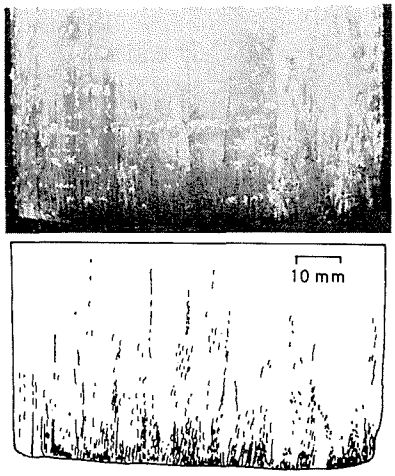
ガラスは全荷重にわたって $\mu_k \approx 0.01$ 程度の最も小さい摩擦を示し，次いでシリコロイ研摩面，ステンレス平滑面，PTFE，アルミニウム，鉄研摩面の摩擦が小さく μ_k は 0.035 以下であった。鉄研摩面とイナータ 160 は μ_k が 0.05～0.07 の中程度の摩擦を示し，シリコロイと鉄の各素面，エポタール，サビ止め塗装面は摩擦が非常に大きく μ_k 0.08 以上であった。この最後のグループのものでは摩擦曲線がスティック・スリップとなり，しかも海氷の摩擦面には摩耗した酸化被膜や塗料の粉がぬりつけられ，ブライン細胞の一部も摩耗粉で着色されていた。第5図にシリコロイ素面との摩擦で摩耗粉が海氷にこすりつけられた様子および第6図にブライン細胞の着色された様子を示した。摩耗粉がぬりつけられているのは摩擦面のうちのごく一部であり，海氷と試験片間の真の接触面積が見かけの接触面のうちのごく僅かの部分であることがわかる。その他の試験片との摩擦でも海氷面に形成される多数の筋や光沢のある平滑面の発生状況から真の接触面積の小さいことを知ることができた。



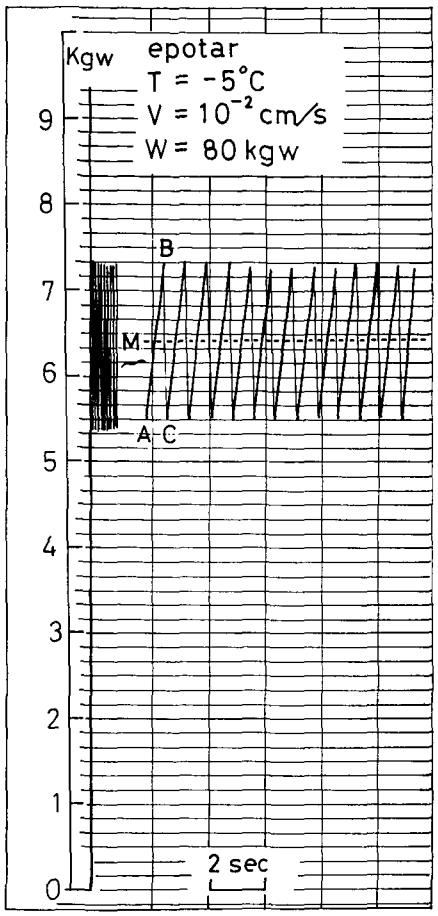
第5図 海氷の摩擦面
シリコロイ素面との摩擦によって摩耗粉が海氷の一部にぬりつけられた（黒い部分）。矢印は摩擦方向

第7図に示すような鋸歯状の摩擦曲線つまりスティック・スリップは氷の種類（海氷，純氷）や温度に関係なく μ_k の大きい材料で速度が 0.2 cm/s 以下のときには常に発生した。スティック・スリップ現象は固体間摩擦の特長とされているものであって，摩擦抵抗が徐々に増加してゆく AB 部分は海氷と試験片が一体となって動いている部分（スティック）であり，急に摩擦抵抗の減少する BC 部分が滑り（スリップ）に対応する。摩擦抵抗のピーク B が静摩擦を示し，鋸歯の中央 M が動摩擦に相当する[16]。

次に速度を 2×10^{-3} cm/s に変えて荷重効果を調べたところ，各荷重で摩擦抵抗は滑走が進むにつれて次第に大きくなって，定常値が得

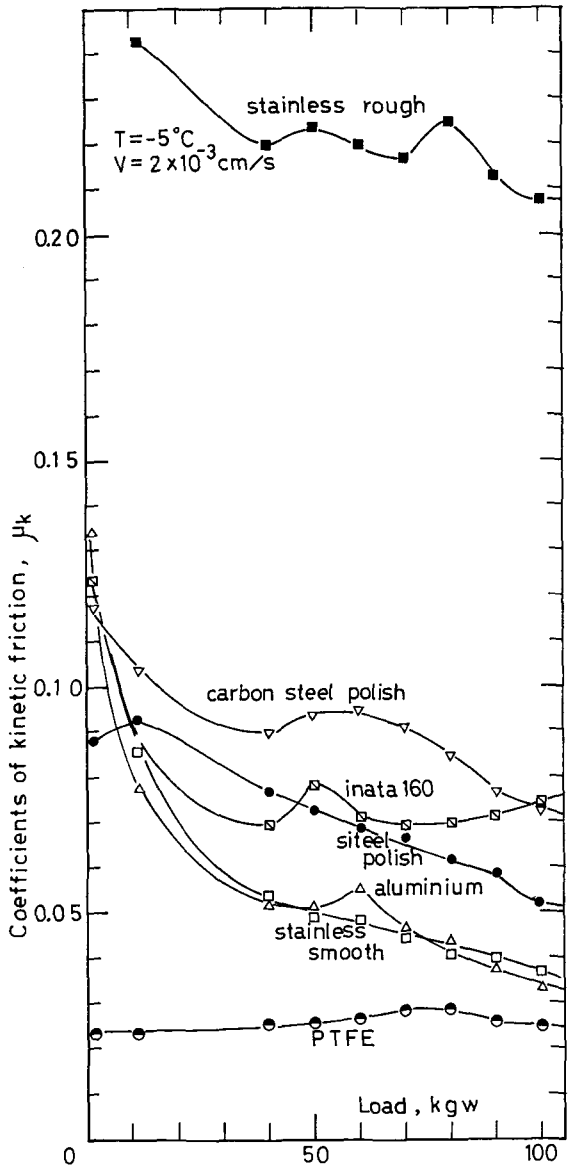


第6図 海氷の垂直薄片
鉄素面との摩擦でブライン細胞の一部が黒く染った。下図は黒く染ったブラインを示す



第7図 鋸歯状摩擦曲線

温度 −5°C, 速度 0.01 cm/s, 荷重 80 kgW, エポタール (バローの海氷)



第8図 荷重効果

速度 2×10^{-3} cm/s, 温度 −5°C, 荷重の減少過程で測定 (バローの海氷)。(■: ステンレス (粗面), 他の記号は第4図に同じ)

られなかった。これは摩擦過程で発生するクリープによって真の接触面積が次々に拡大してゆくためと解釈されたので, あらかじめ実験の最大荷重である100 kgwを30分間加え, 次いで荷重の減少過程で測定を行った。こうすることによって, 各荷重に対しそれぞれ一定の摩擦抵抗をもつ曲線がえられた。第8図はこのような荷重の減少過程で測定した結果である。この速度ではPTFEおよびイナータ160がほぼ一定の μ_k であるのを除くと, 他のどの試験片でも荷重の減少とともに μ_k が増大した。特にその傾向はアルミニウムとステンレスの平滑面で顕著である。μ_k はPTFEが0.025で最も小さく, ステンレスの粗い面は0.21～0.24で最大であった。これらを速度0.01 cm/sの第4図と較べると全体に μ_k が大きくなっているのが注目さ

れる。別に行った，5 cm/s では μ_k は第4図より全般にさらに小さくなった。

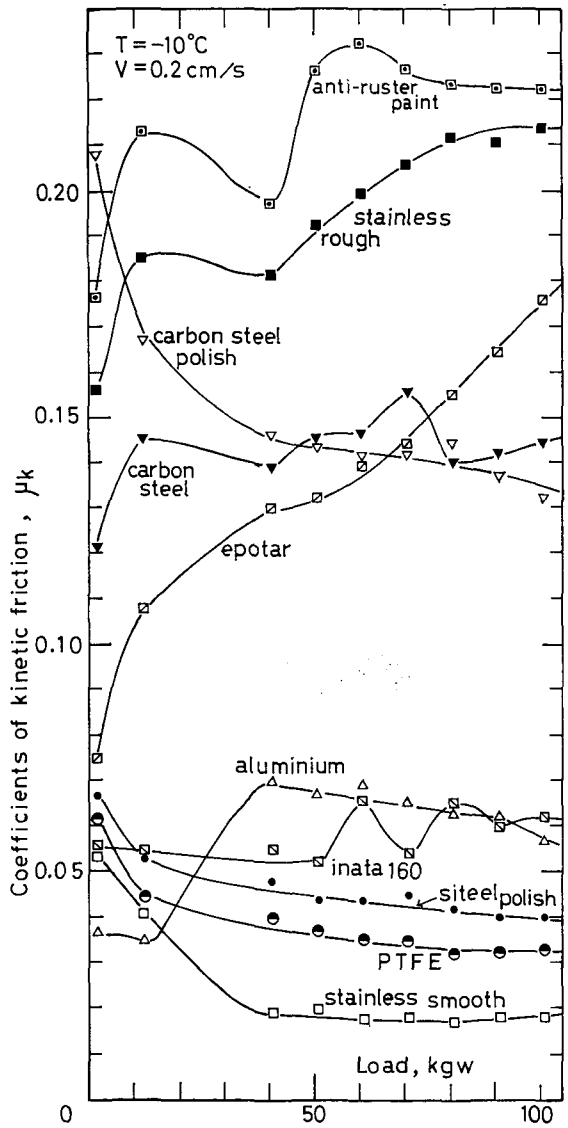
b) −10°C での摩擦

温度が低くなると氷体中のブラインの量が減少し，海氷そのものもかたくなる（納口・田畑[17]）。温度は真の接触面積，摩耗，ブラインの潤滑等に影響をもつことが予想される。第9図は速度 0.2 cm/s のときの荷重効果の測定である。摩擦係数は 0.02 から 0.23 まで広い範囲に分布しているが，−5°C とくらべると μ_k は幾分大きくなった。特にアルミニウム平滑面で μ_k の増大が著しかった。

c) 水槽中での摩擦

海氷と構造物の摩擦は海水中で行われる場合が多い。そのような場合の摩擦を調べる目的で，第2図に示した実験装置の台車の上に底の浅いプラスチック製の水槽（第10図）を取りつけ水槽中におかれた摩擦試験片と海氷間の摩擦を行った。第11図は速度を 5 cm/s とし荷重を 1.3 kgw から 100 kgw まで変えたときの摩擦の測定結果である。

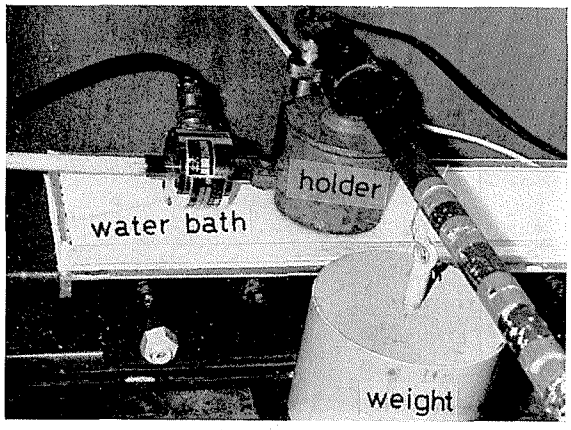
PMMA では μ_k は 0.007 という小さい値を示し，アルミニウムとシリコロイ研磨面でも μ_k は 0.01 まで減少した。海氷の融解温度では海氷と試験片間の剪断強さ（付着強さ）は極めて小さくなると考えられる。その剪断強さの減少効果が平滑面である PMMA やアルミニウム或いはシリコロイ平滑面の摩擦に反映されたものと思われる。PTFE と PE（ポリエチレン）で μ_k が逆に増大しているのも見逃せない。なお速度を 0.01 cm/s としたときステレンレスの粗い面でスティック・スリップが発生したが，ステンレス平滑面の μ_k は 0.003 前後であった。



第9図 荷重効果
温度 −10°C，速度 0.2 cm/s（バロー の海氷）。
（記号は第4図に同じ）

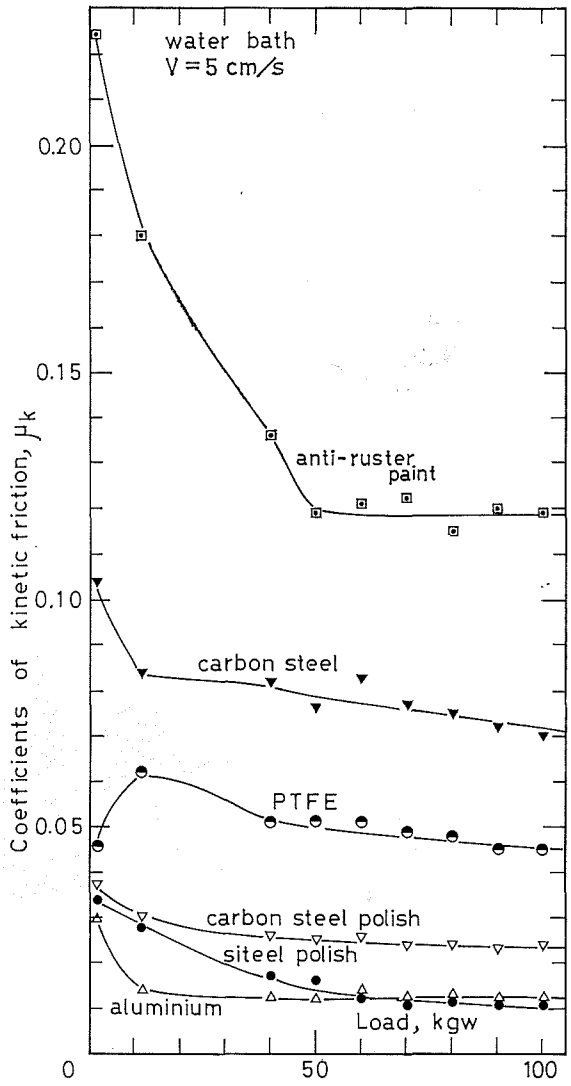
2. 純氷（市販氷）の摩擦

海氷の摩擦においてブラインの効果がどの程度かを調べる一つの方法は海氷とブラインを含まない氷たとえば純氷との摩擦を比較することである。そういう目的で，速度 5 cm/s から



第10図　海水中での摩擦測定用水槽

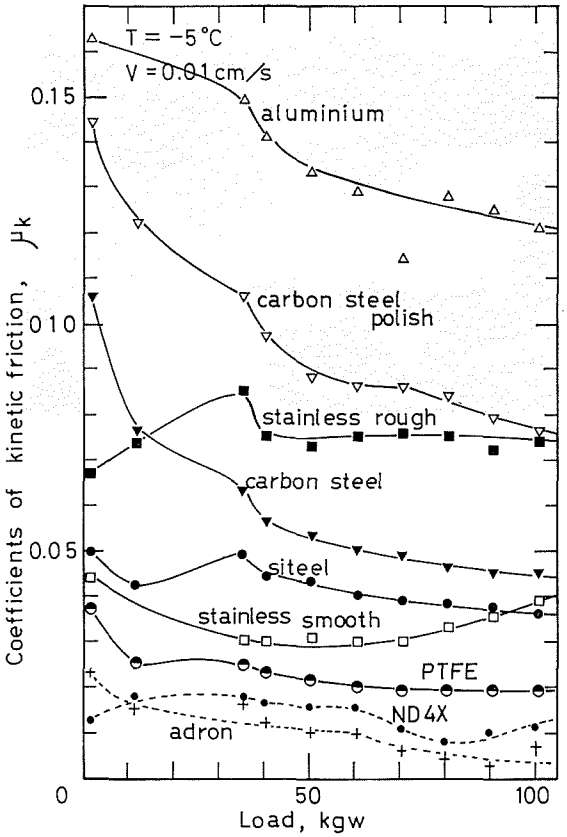
深さ1.5 cmのアクリル製水槽の底におかれた試験片と海氷が摩擦する。試料に被せた鉄ふたの上端からテコで荷重が加えられる



第11図　水槽中での摩擦の結果

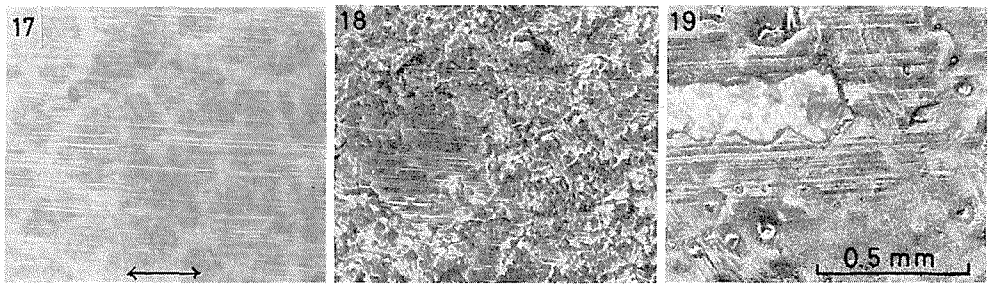
室温 −0.2°C，速度5 cm/s（バローの海氷）。（記号は第4図に同じ）

2×10^{-3} cm/s の間で，各種試験片に対する荷重効果の測定を行った。第12図には温度 −5°C で速度を 0.01 cm/s としたときの μ_k を荷重の関数として示した。μ_k は摩擦材を変えると 0.03 から 0.16 まで分布したが，バローの海氷（第4図）にくらべ若干 μ_k が大きくなった程度である。



第12図 純氷の摩擦
温度 −5°C，速度 0.01 cm/s（市販氷），（●：ND-4X，＋：アドロン，その他の記号は第4図に同じ）

市販氷を用いた測定ではバローでの実験後に入手した4種のコーティング材（第1表の No. 17～20）の摩擦を追加した。これらはアルミニウム板の上にコーティングされたものでアドロンと ND-4X は抜群に小さい μ_k を示した。F 2035 BK, ES 5109 BK, アドロンではコーティング膜が斑点状に剝離したのに，ND-4X ではそのような剝離は認められなかった。第13図は本研究終了後にとった各コーティング面の写真である。ND-4X では滑走方向に平行な多数の引っかきキズが認められるだけであるが，他のコーティング面では剝離した部分が白い斑点となってた。このようにコーティング材では剝離という問題があるので，実際の海氷域で巨大な流氷が衝突した場合，ND-4X のような低摩擦材でもコーティング膜を剝離から守れるかどうかは疑問である。

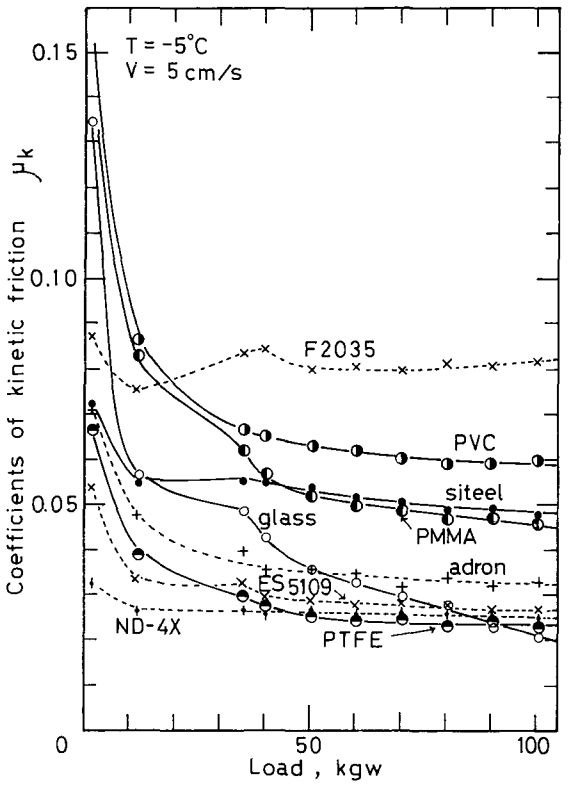


第13図 コーティング材の摩擦面
17：ND-4X，18：アドロン，19：ES 5109，矢印は摩擦方向

3. 人工海氷の摩擦

市販氷の測定から，ND-4X とアドロンの摩擦が特に小さいことがわかったので，これら

の材料の海氷に対する摩擦を調べる目的で，海水を凍らせて作った海氷を用いて摩擦を調べた。第14図は温度 −5°C で速度5 cm/s のときの測定結果である。ND-4 X, ES 5109, アドロンは海氷に対してもまた小さい摩擦を示していた。



第14図 人工海氷の摩擦

温度 −5°C, 速度 5 cm/s (×：F 2035, ＋：アドロン, ×：ES 5109, ◖：ND-4 X, ◐：PVC, ●:シリコロイ, ◐：PMMA, ○：ガラス, ◓：PTFE)

4. 氷の種類による摩擦の違い

氷がかたいかやわらかいか或いはブラインを含むか否かは真の接触面積や潤滑に影響をもつことが予想される。その効果を調べる目的で，温度を −5°C, 速度を 0.2 cm/s とし，荷重を 1.3 kgw から 110 kgw まで変えたときの動摩擦係数 μ_k をバローの海氷，市販氷，人工海氷の3種について測定した。結果を第2表に示した。

アルミニウムと PMMA を除くと，摩擦に及ぼす氷の種類の影響は少ないようである。

アルミニウムと PMMA はバローの海氷で μ_k 0.01～0.03 であったのに，市販氷では 0.1～0.25 という著しく大きい値となった。この違いを説明するにはさらに詳しい実験・観察を必要とするが，ダイヤモンドカッターで切った海氷面と旋盤で削った市販氷との表面粗さの違いの他に，市販氷の実験では海氷で腐食したアルミニウムを研磨して用いたこと PMMA ではそれまでの測定中に無数のキズが形成されたことなども関与していると思われる。

第2表 海氷（バロー），人工海氷，市販氷

	load kgw	Carbon steel	Carbon steel (sanded)	Alumi-nium (smooth)	Stainless steel (smooth)	Stainless steel (rough)	Siteel (sanded)	Brass (sanded)	Glass (smooth)
Sea ice (Barrow)	1.3	0.139	0.064	0.067	0.054	0.118	0.025		
	11.3	0.153	0.062	0.028	0.039	0.131	0.025		
	35	0.159	0.063	0.032	0.034	0.135	0.019		
	40	0.162	0.068	0.031	0.030	0.130	0.020		
	50	0.164	0.068	0.030	0.032	0.129	0.020		
	60	0.174	0.070	0.029	0.029	0.133	0.021		
	70	0.175	0.070	0.028	0.029	0.132	0.020		
	80	0.175	0.069	0.027	0.029	0.137	0.022		
	90	0.185	0.070	0.028	0.028	0.138	0.020		
	100	0.180	0.070	0.027	0.028	0.134	0.021		
Artificial Sea ice	1.3	0.071	0.096	0.112	0.050	0.077	0.050	0.081	0.073
	11.3	0.052	0.077	0.088	0.034	0.070	0.044	0.082	0.020
	35	0.062	0.083	0.086	0.029	0.074	0.043	0.081	0.014
	40	0.067	0.077	0.083	0.026	0.067	0.043	0.078	0.014
	50	0.067	0.078	0.082	0.023	0.067	0.040	0.075	0.013
	60	0.066	0.074	0.077	0.022	0.061	0.041	0.075	0.011
	70	0.065	0.073	0.087	0.023	0.060	0.044	0.069	0.011
	80	0.066	0.071	0.076	0.020	0.062	0.042	0.068	0.009
	90	0.064	0.071	0.076	0.019	0.064	0.044	0.053	0.011
	100	0.063	0.066	0.073	0.019	0.064	0.046	0.053	0.010
	100	0.061	0.064	0.072	0.019	0.065	0.042	0.064	0.009
Commercial ice	1.3		0.140	0.135	0.073	0.092	0.048	0.106	0.058
	11.3		0.098	0.113	0.041	0.078	0.045	0.098	0.026
	35		0.114	0.113	0.039	0.083	0.045	0.124	0.016
	40		0.108	0.113	0.038	0.083	0.042	0.113	0.013
	50		0.108	0.107	0.038	0.085	0.042	0.093	0.010
	60		0.108	0.107	0.039	0.085	0.048	0.090	0.011
	70		0.101	0.104	0.039	0.086	0.041	0.089	0.017
	80		0.103	0.103	0.040	0.084	0.042	0.086	0.025
	90		0.103	0.097	0.042	0.086	0.043	0.086	0.037
	100		0.101	0.098	0.040	0.086	0.042	0.085	0.046

の摩擦温度 −5°C, 速度 0.2 cm/s

PTFE	PMMA	PVC	PE	anti-ruster coated	epotar	inata 160	ND-4X	Adron	ES 5109 BK	F2035 BK
0.023	0.047		0.017		0.106	0.094				
0.024	0.034		0.014		0.122	0.075				
0.020	0.020		0.013		0.143	0.066				
0.022	0.022		0.012		0.148	0.063				
0.016	0.021		0.014		0.144	0.060				
0.013	0.021		0.015		0.152	0.064				
0.015	0.016		0.016		0.160	0.063				
0.016	0.015		0.016		0.165	0.061				
0.013	0.014		0.015		0.178	0.062				
0.013	0.013		0.016		0.184	0.062				
0.046	0.104	0.090	0.067	0.167	0.104	0.085	0.050	0.100	0.063	0.094
0.030	0.053	0.039	0.053	0.150	0.131	0.079	0.021	0.038	0.035	0.091
0.023	0.036	0.032	0.048	0.165	0.096	0.085	0.017	0.021	0.044	0.102
0.020	0.034	0.030	0.046	0.170	0.141	0.085	0.015	0.021	0.045	0.104
0.018	0.033	0.030	0.047	0.175	0.147	0.087	0.015	0.020	0.045	0.100
0.017	0.031	0.028	0.047	0.178	0.149	0.088	0.014	0.020	0.046	0.102
0.015	0.029	0.028	0.048	0.183	0.148	0.088	0.013	0.020	0.046	0.105
0.015	0.029	0.029	0.049	0.184	0·145	0.084	0.014	0.022	0.047	0.103
0.016	0.028	0.028	0.048	0.180	0.146	0.082	0.013	0.025	0.047	0.103
0.013	0.027	0.025	0.049	0.178	0.145	0.086	0.012	0.023	0.046	0.098
0.014	0.026	0.026	0.053	0.180		0.080	0.011	0.021	0.045	0.094
0.054	0.221	0.102	0.073	0.200	0.192	0.106	0.038	0.065	0.040	0.104
0.028	0.123	0.072	0.073	0.225	0.236	0.090	0.018	0.026	0.028	0.100
0.024	0.140	0.065	0.060	0.229	0.243	0.095	0.024	0.021	0.021	0.102
0.019	0.241	0.066	0.055	0.228	0.247	0.098	0.022	0.019	0.019	0.102
0.017	0.255	0.068	0.055	0.228	0.245	0.092	0.023	0.018	0.013	0.100
0.019	0.283	0.072	0.053	0.215	0.253	0.088	0.019	0.021	0.013	0.099
0.017	0.275	0.073	0.053	0.208	0.225	0.081	0.018	0.019	0.012	0.096
0.020	—	0.073	0.053	0.202	0.222	0.080	0.018	0.018	0.013	0.098
0.018	—	0.073	0.052	0.194	—	0.078	0.517	0.018	0.019	0.099
0.015	—	0.075	0.054	0.188	—	0.076	0.015	0.018	0.018	0.097

5. 低速度の摩擦について

海氷の特異性が氷体内に潤滑可能なブラインを含む点にあることはすでに述べた。ブラインは摩擦界面にしみ出て摩擦面をぬらしたので，ブラインが流体潤滑の役をすることも考えられる。

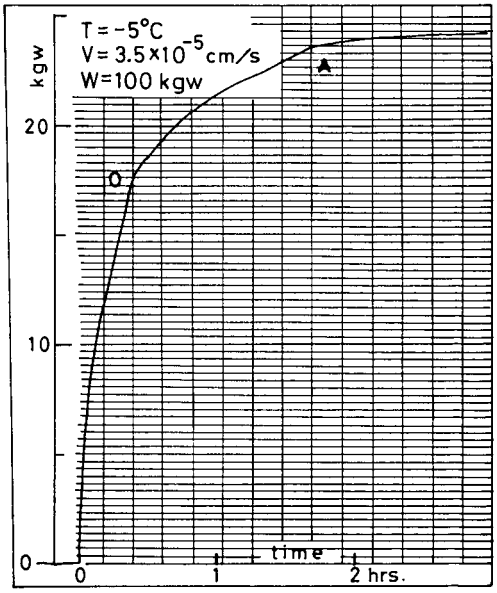
もしブラインが流体潤滑をするとすれば，摩擦抵抗は速度に依存するはずである。例えば本装置の最大速度 5 cm/s から速度を遅くして 1.7×10^{-4} または 3.5×10^{-5} cm/s とすれば，μ_k は 10^{-4} ないし 10^{-5} 倍減少するはずである（ただし真の接触面積が変わらない場合）。この点を明らかにするために行った低速度の摩擦の結果を第 3 表に示した。μ_k は予想に反し，高速 (5 cm/s) の場合と同じか，それより幾分大きくなった。

第 3 表　低速度摩擦の結果

温度 −5°C, 荷重 50 kgw

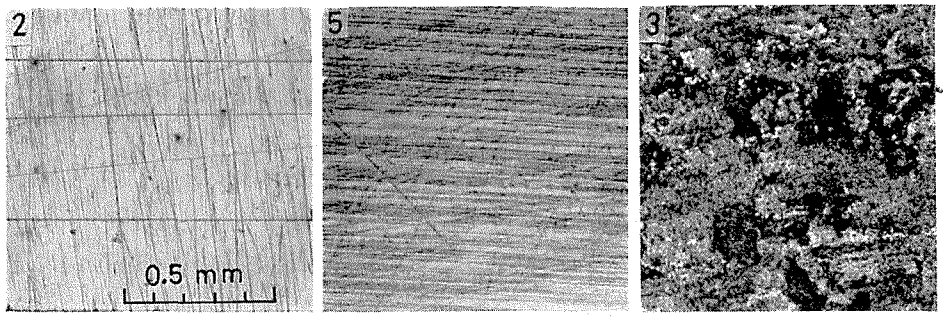
氷の種類	速度 (cm/s)	摩擦材 ステンレス平滑面	ステンレス粗面	シリコロイ研磨面	鉄研磨	鉄素面	PTFE	PE	イナータ 160	サンドスクリーン
海氷（バロー）	1.7×10^{-4}	0.06	0.26	0.07			0.03			0.60
	3.3×10^{-5}	0.07	0.28	0.11	0.14					
	5	0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.06		
市販氷	1.7×10^{-4}	0.04	0.11			0.06	0.04	0.12	0.12	

第 15 図はステンレス平滑面を速度 3.5×10^{-5} cm/s, 荷重 100 kgw で摩擦したときの摩擦曲線である。摩擦抵抗は滑走が進むとともに増大して 2 時間後（図の点 A）つまり 0.3 mm 滑ったところでようやく一定値となった。摩擦の徐々に増大する OA は氷のクリープによる真の接触面積の拡大に基づくのであろう。このように真の接触面積は速度に依存するので，μ_k の速度依存は単純ではない。仮に流体潤滑とすれば，第 3 表の結果を説明するためには真の接触面積を 10^4〜10^5 倍変えなければならず，そのように面積を変えることは不可能である（3.5×10^{-5} cm/s のとき全面（44 cm²）が理想的接触をしたとしても，5 cm/s では 1.3×10^{-4} cm² となり真の接触面の圧力は氷の硬さよりはるかに大きい 800 ton/cm² となる）。考察の項で述べるように，第 3 表の結果はむしろ固体間摩擦として説明される。その考えでは低速での摩擦の増大を説明するには高々 10 倍程度の真の接触面の拡大を考えればすむであろう。

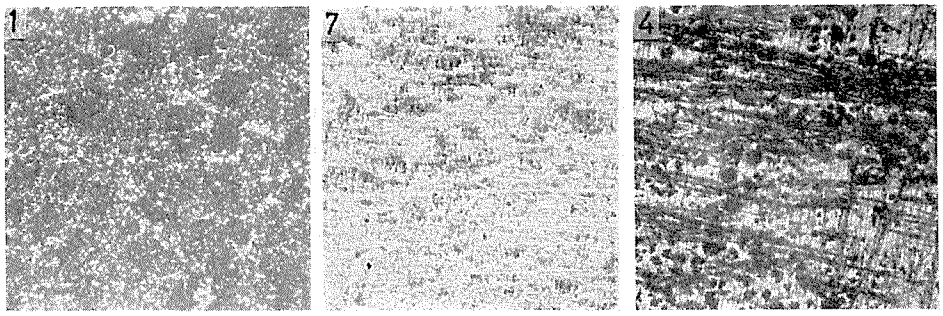


第 15 図　低速度の摩擦曲線

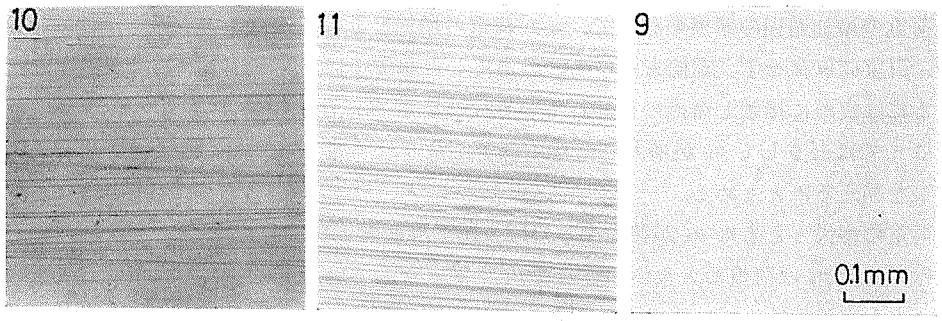
温度 −5°C, 速度 3.5×10^{-5} cm/s, 荷重 100 kgw（バロー海氷）



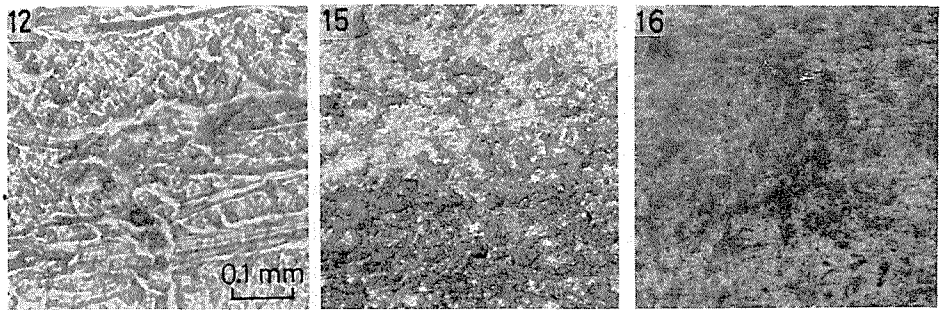
ステンレス（平滑面）　アルミニウム　鉄（研磨面）



ステンレス（粗面）　シリコロイ（研磨面）　鉄（素面）



PMMA　PVC　PTFE



PE　エポタール　イナータ 160

第16図　摩擦試験片

9, 12 以外の写真の倍率は 2 に同じ

6. 摩擦面の観察

第16図に金属，プラスチックス，塗装面の各摩擦面の顕微鏡写真を示した。顕微鏡でみると摩擦の小さいステンレス平滑面(2)やアルミニウム平滑面(5)にも無数の線状のキズがあった。ステンレス粗面(1)，シリコロイ研磨面(7)，鉄研磨面(3)等は凹凸をもつ面であって，特に(1)の凹凸がはげしい。

10, 11 の PMMA, PVC では摩擦によって滑走方向に平行な無数の筋が形成された。9, 12 の PTFE と PE では他のものにくらべ倍率を大きくして調べたが摩擦痕を明瞭にとらえることはできなかった。15, 16 の塗装面は凹凸のある面で，15 で白っぽく見える部分はエポタールが摩耗して平滑化されたところである。

V. 考　　察

以上の結果から，海氷の摩擦は摩擦材料や表面の粗さに著しく依存すること，海氷と純氷の摩擦を較べると動摩擦係数 μ_k に大きな違いのないこと，海水中の摩擦においてさえ固体摩擦の典型であるスティック・スリップの発生する場合のあること，海氷はブラインという潤滑液を含んでいるのに，その潤滑効果が μ_k には殆んど現われないことなどがわかった。

以下に荷重効果，表面粗さの効果，ブラインの潤滑への寄与，摩擦機構等について考察を加えてゆく。

1. 荷重効果について

荷重の増加過程の摩擦の測定で，μ_k が荷重の増加とともに増大するものや，逆に減少するもの，荷重に依存せず一定値を示すもののあることをすでに述べた。これらの現象を厳密に説明するには実際に接触し摩擦の行われている真の接触面に注目した定量的研究を必要とするが，ここではどうして μ_k が増大したり，減少したり，一定となったりするのかについて簡単な考察を加えるにとどめる。

荷重の増大とともに μ_k が減少するのは金属平滑面および摩耗を生じない塗装面である。これらの場合 μ_k は荷重の大きいところで μ_k 一定となっている。そのことは荷重の大きいところでは氷と摩擦試験片間に形成される真の接触面積は荷重に比例する（真の接触面の圧力を P_0 とすると P_0＝一定）が，荷重の小さいところでは P_0 より圧力が小さい，つまり平滑面では真の接触面積が荷重の割りに広くなっていると解釈される。ところがシリコロイ研磨面のように粗い面ではシリコロイ表面の突起部で接触するために，荷重の小さいところでも接触面の圧力は P_0 になっているのであろう。荷重の増加とともに μ_k が増大するのは，サビ止め塗装面，エポタール或いは鉄・シリコロイの素面で摩耗の発生する場合である。摩擦過程で発生した摩耗粉は氷の滑走面にぬりつけられ（第5図），事実上塗装面と摩耗粉間の摩擦となる。摩耗は荷重が大きいほど激しくなって，μ_k も荷重の増加とともに増大するのであろう。比較的やわらかく弾性の強い PTFE で μ_k 一定となるのは真の接触面積 A が主に PTFE の弾性変形に支配され，A は荷重に比例するのであろう。

2. ステンレスの摩擦における粗さの効果について

ステンレスの光沢のある平滑面と粗いざらざらした面の摩擦を比較すると，同じステンレ

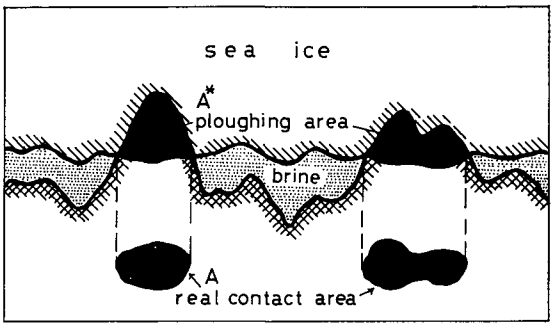
スでも粗い面の摩擦が著しく大きい(4～10倍)ことを第8, 9図, 第2表等から知ることができる。摩擦材間の真の接触面積は, どちらかというと平滑面の方が大きいと思われるので, 粗い面で10倍も摩擦の大きくなることを真の接触面の大小によって説明することはできない。

以前筆者[11),12)]が行った氷の摩擦機構の議論の中で, 氷の剪断強さは硬さにくらべ大変小さい(約1/100)ことに注目して, 氷と他物質間の摩擦における掘り起こし抵抗の重要性を指摘した。そのため, 金属間の摩擦では通常無視される掘り起こし抵抗が, 氷では剪断抵抗を上回ることもある。

粗いステンレス面と氷との接触ではステンレスの突起部は第17図に示すように氷の表面にくい込み, 氷に溝を掘って進むことになる。そのときの溝掘り抵抗 F_p は進行方向と直角な面への溝の投影面積 A^* と氷の硬さ p の積にほぼ等しいであろう。一方, 剪断抵抗 F_s は接触面を水平面に投影した面積 A と界面剪断強さ s の積に等しく, 摩擦抵抗 F は

$$F = F_s + F_p = As + A^*p$$

とあらわされる。海氷の p は不明であるが, 氷のブリネル硬さ p (-5°C で 700 kgw/cm^2[18)]) より幾分小さいと考えてよいであろう。ステンレスと海氷間の付着強さの値はわからないが, 仮に氷との値 5 kgw/cm^2[19] を用いると, p は s の100倍にもなるので, 掘り起こし断面積 A^* が接触面積 A の100分の1程度になると掘り起こし抵抗を無視できなくなる。



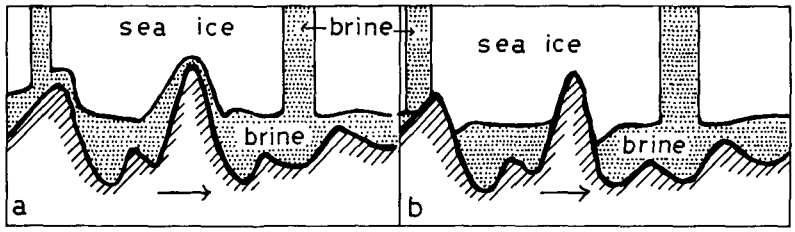
第17図　ステンレス粗面と氷の接触
ステンレスの突起の一部が氷にくい込んでいる。A は真の接触面を水平面に投影した面積, A* は氷にくい込んだ突起を垂直面(滑走方向に垂直)に投影した面積。試験片は紙面に垂直に動く

今, 仮に平滑面では掘り起こし抵抗を無視できると考えると, 粗い面の掘り起こし抵抗は剪断抵抗の4～10倍ということになる。勿論本実験に用いた平滑面といえども第16図からわかるようにかなりのキズがあり, したがってかなりの掘り起こし抵抗を含んでいると見なすべきであろう。

ステンレス粗面の摩擦曲線はスティック・スリップであった。これは一度氷にめり込んだステンレスの突起部と氷は始めは一体となって動くが, 動くにつれ氷に加わる剪断力が増してある限界の力(第7図の点B)に達したところで氷は耐えきれずに破壊し, すべってしまう。滑り終ったところ(C)で再び氷にくい込み, 前と同じことを次々にくり返す。このため鋸歯状の摩擦曲線となるのである。このスティック・スリップは水槽中でも現われたが, ステンレスの突起の氷へのくい込みに基づくと考えられる。一方, 突起の少ない平滑面では, スティック・スリップは発生しなかった。

3. ブラインの潤滑への寄与ならびに摩擦機構について

海氷の特異性は氷体内にブラインを含んでいることで, ブラインは接触面に浸み出て滑走面を全体にわたってぬらした。ここで問題となるのはブラインが第18図bのように真の接触面から完全に排除されている(つまり純粋の固体間接触)のか, 或いは逆に第18図aのように



第18図 ブラインでへだてられた接触(a)と固体間接触(b)
a：ブラインが固体間の直接接触を妨げている，**b**：ブラインが真の接触面外に排除され固体間接触をしている

真の接触面間にはさまれて海氷と試験片間の真の接触をさまたげているのかどうかということである。ブラインが潤滑効果をもつかどうかは海氷の摩擦機構（流体摩擦か固体摩擦か）を決定的に左右するもので，海氷の摩擦における最も重要な問題の一つである。

第12図と第4図および第2表で純氷と海氷との動摩擦係数 μ_k を較べると顕著な差が認められない。逆にES 5109 BKのようにブラインを含むと摩擦の増大するものもあり，ステンレスの粗い面や，塗装面，酸化被覆面などで固体間摩擦の特長とされるスティック・スリップの発生することなどから，ブラインは真の接触面をはみ出て固体間接触が形成されていると解釈される。そのことはステンレスやガラスの平滑面についてもいえる。もしこれらの平滑面で真の接触面内にはさまれたブラインが流体潤滑をするとすれば，摩擦抵抗 F は流体摩擦の抵抗

$$F = \eta \frac{v}{d} A$$

となるはずである。但し，η はブラインの粘性係数，v は摩擦速度，A は厚さ d のブラインで境された真の接触面積である。F の大きさを計算するために，v を最大速度の5 cm/s，A を4 cm^2，d を10^{-4} cmとすると，

$$F = 3.6 \text{ grw}$$

となる。これは実測された摩擦抵抗（ステンレス平滑面の場合，荷重50 kgwでF=1 kgw）の300分の1にすぎない。今仮に見かけの接触面の全体に当る44 cm^{2}が10^{-4} cmの厚さのブラインで境されていたとしても，そのために生ずる摩擦抵抗は40 grwで実測された摩擦の25分の1足らずである。従って，ブラインの潤滑効果はないと考えてよい。

もし流体潤滑があるとすれば，速度が遅くなるほど μ_k は減少するはずであるが，ステンレス平滑面で速度を5 cm/sから3.5×10^{-5} cm/sまで変えても μ_k に大きな変化の現われないことも上の結論を支持している。

以上の考察では純氷と海氷で μ_k に大差のないことを流体潤滑に否定的な根拠の一つとしたが，もし純氷の摩擦で融解水が形成されているとすれば問題は変る。そこで摩擦面の温度上昇を検討しておこう。

摩擦熱を発生させながら移動する物体の表面温度の上昇（ΔT）についてはJaeger[20]の理論があって，次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{\mu_k WV}{4a} \frac{1}{k_1 + k_2}$$

但し，W は荷重，V は速度，a は真実接触面の半径，k_1, k_2 は氷および滑走材の熱伝導率である。いま最大の温度上昇を見積るために，μ_k, W, V に本実験の最大値に近い値 $\mu_k = 0.2$, $W = 10^5$ dyn, $V = 5$ cm/s を用い，k_2 として断熱性のよい PMMA の値を用いると，$k_1 = 22 \times 10^4$, $k_2 = 2 \times 10^4$ erg/cm·s·k, a を仮に 0.3 cm (圧力 350 kg/cm^2) とすると，

$$\Delta T = 0.3°C$$

となって，$-5°C$ 以下で行われた実験では表面温度の上昇を無視して差し支えない。したがって前述の議論も修正の必要はない。

VI. ま と め

海氷と各種構造物材料との摩擦に関する基本的データをえること，およびブラインの潤滑効果を明らかにし，海氷の摩擦機構の手がかりを得る目的で，多数の平板試験片と海氷および純氷との動摩擦係数 μ_k をいろいろの荷重 (1.3～110 kgw), 速度 ($5 \sim 3.5 \times 10^{-5}$ cm/s) に対して測定した。

μ_k は摩擦材によって 0.003～0.3 の値をとった。荷重を変えると，μ_k が荷重の増大とともに A: 増すもの, B: 減少するもの, C: 一定のものがあった。概して，A は μ_k が大きく，摩擦はスティック・スリップとなり，BC は μ_k が小さかった。

特に摩擦の小さいのはコーティング面の ND-4 X とアドロン，ステンレス平滑面，アルミニウム，シリコロイ研磨面であった。ただしアドロンでは被膜が斑点状に剝離した。また同じステンレスでも粗い面は平滑面の 4～10 倍の大きな摩擦を示した。

海氷はブラインという潤滑油を内蔵している点で特異な物質であるが，動摩擦係数で較べると純氷との間に大差なかった。また 10 万倍の速度変化に対しても μ_k の変化は数倍にとどまった。

最後にブラインの効果を議論し，ブラインが潤滑の寄与をしていないことを示し，海氷の摩擦機構は純氷の摩擦と同じ固体間の摩擦 (凝着説) であると考えた。

おわりに，海氷と構造物間の摩擦の問題を指摘し，本研究の遂行を強く勧められ，かつ金属試料，塗装試料の大半を提供された三井造船の八島信良氏，本研究に関し種々討論され，Barrow での研究に多大の協力を受けた低温科学研究所流氷研究所施設の青田昌秋助教授，大学院生納口恭明君に心から感謝いたします。

実験装置を製作された低温科学研究所檜森政治・新堀邦夫技官，バローでの研究に施設を提供し便宜をはかられた Naval Arctic Research Laboratory の副所長 Dr. Kelley と職員の方々に感謝します。なおシリコロイ試験片はシリコロイ研究所の太田雉一博士から，ND-4 X, アドロン等のコーティング材は低温科学研究所若浜五郎教授から提供された。

本研究は流氷研究施設アラスカ調査費により行われた。

文　献

1) 田畑忠司 1978 流氷. 北海道新聞社, 229 pp. または毎日グラフ, 1977年5月22日号, 1-7.
2) Bercha, F. G. and Danys, J. V. 1975 Prediction of sea ice forces on conical offshore structures. *Marine Scie. Communications*, **1**, 365-380 (又は *Proc.third Int'l Symp. on Ice Problems*, Ed. Frankenstein, G. E., 447-458, 1975).
3) Danys, J. V. and Bercha, F. G. 1975 Determination of ice forces on a conical offshore structure. *Mar. Sci. Communications*, **1**, 351-364.
4) Swadmidas, A. S. J., Reddy, D. V. and Purcell, G. 1977 Ice-structure interaction with artificially generated force records. *J. Glaciol.*, **19**, 265-283.
5) 田畑忠司 1978 海氷. 海洋の物理 IV, 東海大学出版会, 112-221.
6) Marsh, G. D., Gulick, R. W. and Calabrese, S. J. 1978 The operating and maintenance benefits of abrasion resistant low friction hull coatings. *10th Annual Offshore Technolgoy Conference in Houston*. 939-948.
7) Airaksinen, K. 1972 Free beam tests and friction tests at Pond Inlet, N.W.T. *Polarforshung*, **42**, 2, 71-75.
8) Grothues-Spork, H. 1974 Aufmessung der Stömungen unter dem Eis des Eclipse Sound (Baffin Island) und Bestimmung von Reibungskoeffizienten zwischen Stahl und Eis. *Polarforschung*, **44**, 1, 76-82.
9) Finke, S. 1974 Untersuchungèn zum Verfomungsverhalten des Meereis im Eclipse Sound (Baffin Island) und Messungen des Reibungskoeffizienten Stahl-Eis. *Polarforschung*, **44**, 1, 75-81.
10) Schwarz, J. and Weeks, W. F. 1977 Ergineering properties of sea ice. *J. Glaciol.* **19**, 499-531.
11) 対馬勝年 1977 単結晶氷の摩擦に関する研究 I, II, III. 低温科学, 物理篇, **35**, 1-46.
12) 対馬勝年 1976 氷の摩擦機構について. 潤滑, **21**, 287-294.
13) Joly, J. 1887 The phenomena of skating and professor J. Thomson's thermodynamic relation. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, **5**, 453-454.
14) Bowden, F. P. and Hughes, T. P. 1939 The mechanism of sliding on ice and snow. *Proc. Roy. Soc.* **A**, **172**, 280-298.
15) 納口恭明・青田昌秋・田畑忠司 1978 北極圏海氷調査 IV—圧縮強度の測定. 低温科学, 物理篇, **37**, 131-139.
16) バウデン・テーバー (曽田範宗訳) 1961 固体の摩擦と潤滑. 丸善, 332 pp.
17) 納口恭明・田畑忠司 1977 海氷の圧縮強度. 低温科学, 物理篇, **35**, 221-231.
18) Butkovich, T. R. 1954 Hardness of single ice crystals. *SIPRE Res. Pap.*, **9**, 12 pp.
19) Jellinek, H. H. G. 1957 Adhesive properties of ice. *SIPRE Res. Rep.* **38**, 20 pp.
20) Jaeger, J. C. 1942 Moving sources of heat and temperature at sliding. *Proc. Roy. Soc. New. South Wales*, **76**, 203-224.

Summary

Nowadays, practical matters resulting from damage on oil piers, lighthouses, icebreakers, etc., have exalted the importance of a study of friction between sea ice and marine structures. Sea ice is also a very interesting material from the viewpoint of frictional mechanism because it contains a liquid lubricant, namely brine, in itself.

A friction apparatus as shown in Fig. 2 was made: a truck 50 cm long is driven at various constant speeds from 3.5×10^{-5} to 5 cm/s by a motor and a set of reduction gears; a cylindrically shaped ice sample was fixed as a slider vertically in space, with its bottom in

contact with a horizontal surface of a plate (metals, glass, plastics, or plate with a coating) which was fixed to the truck by screws; a load from 1.3 to 110 kgw was applied on the ice sample at the top using a weight and a lever. Then, as the truck moves, friction is generated between the bottom of the ice slider and the plate in contact with it.

Ice samples used were natural sea ice of Barrow, Alaska, commercial ice (pure ice) and artificial sea ice.

Results of the test at Barrow (April 1978) are shown in Figs. 4, 8, 9 and 11: the coefficient of kinetic friction, μ_k, in the ordinate against the load in the abscissa were found varying in a wide range: from 0.01 on glass surface, to 0.24 on a surface coated with anti-rusty paint. In general, the smooth surface had low friction, while the rough surface and the surface, from which abrasive materials come off easily, had high friction. When the velocity was changed by 10^5 times from 3.5×10^{-5} to 5 cm/s, the change in μ_k was as small as a few times. To examine the effect to brine on friction, friction of commerical ice was measured. As shown in Fig. 12, however the results are that it did not differ so much from that of sea ice. Therefore, one may conclude that brine had very little effect as lubricant.

Friction of natural sea ice, artifical sea ice and commercial ice against verious materials are tabulated in Table 2, from which it is recognizable that low frictional materials are ND-4X, adron, stainless steel (smooth surface), siteel (steel contained of 5% silicon, sanded with 4/0 grade emery paper), PTFE, etc.

It is noticed that a coating of adron wore easily, as shown in Fig. 13 (No. 18). It should be considered in practical selection of low frictional materials that they need to possess low friction as well as anti-erosive and anti-abrasive properties.