

# 氷雪のトライボロジー

2013

富山大学

富山大学名誉教授 対馬勝年

E-mail [tusima@sci.u-toyama.ac.jp](mailto:tusima@sci.u-toyama.ac.jp)



## はしがき

学術の発展には知の効果的な伝承が大切である。次代を担う有為な青年が、先人の歩んだ道を振り出しに戻って、初めから歩むことを繰り返していたら、わが国の学術の発展は随分非効率なものになるだろう。そんなムダを省くため、各段階で総合的な整理が必要なのだと思う。

著者は氷雪の摩擦に40年以上携わって、真理探究を使命とする科学の世界においても、肝心な部分がはしばしば主観や直観に彩られるのに気づいた。また、様々な視点からの総合的な検討が容易ではないこと、新しい学説や新しい主張を正しく評価することの難しさ、批判精神に徹して学説を吟味することの難しさも知った。先入感の打破や批判精神の強化はわれわれ日本の科学者だけでなく、欧米の科学者にも当てはまるようである。

Joly や Bowden らが氷の低摩擦を説明する場合、氷の特性について十分な検討のないまま**圧力融解・水潤滑説**や**摩擦融解・水潤滑説**が提案されたことに気づく。たとえそうだったとしても後の研究は「これらの学説を真に科学的に吟味したのだろうか」という疑問にも突き当たる。多くが、一面の批判であったり、無批判とも思われる受容であったりが目立つからである。氷雪の摩擦について、本書ではこれまでの科学論文で扱われなかったこと、あるいは触れようとしなかった部分にも立ち入って議論を試みたい。それが知の伝承・発展に必要と思われるからである。

氷雪の低摩擦を説明する学説としては、1950年以降、**水蒸気潤滑説**や**擬似液体膜潤滑説**、**水分子回転子説**、**雪粒の流動潤滑説**や**凝着説**も提案された。しかし、これらの学説の中には、水蒸気潤滑説、擬似液体膜潤滑説（氷表面溶解説）のようにほとんど実験データを説明せず、思いつきだけで提案されたと思われるのに、学説への賛同者が少なくないのは驚くほどである。

氷雪の摩擦では歴史認識でも禍根があった。Joly(1886)ではなく Reynolds(1889)を圧力融解・水潤滑説の最初の提唱者とする論文や著書が後を絶たないことや近年注目を浴びているカーリングストーンのカールについて Harrington(1924)の初期の総合研究が見落とされていたことなどである。この不幸な歴史は Reynolds 自身の主観や Reynolds の原文を引用し、誤解を広めた Bowden ら(1939)の有名な論文の非を問わないわけにいかないであろう。

カナダの Niven (ニーブン) は Bowden らの論文を批判的に吟味した科学者の一人である。Niven はカナダ国立研究所から氷の摩擦に関する多くの論文や著書(The Magic surface)を発表した。Niven の研究は摩擦融解・水潤滑説への批判精神に貫かれている。カナダの Physics of ice の著者 Pounder も Niven の研究を評価した。カナダでは圧力融解・水潤滑説の提唱者として Joly が早くから紹介されていたことも Niven らの功績によるといえよう。

氷の低摩擦の説明として、「摩擦融解・水潤滑説」が圧倒的に多くの研究者から支持を受けたことから、多数決が民主的な判定だと仮定するならば、正しい学説といえるかもしれない。しかし、科学の世界で多数決は禁物である。筆者が直観し本書の随所で指摘するように、摩擦融解・水潤滑説は自己矛盾の学説であり、問題がある。もしそうならば、これまでに発表されてきた多くの論文や解釈に無理があったに違いない。そういう思いから、本

書ではいくつかの主要な論文について問題点の吟味も加えた。

筆者は人類史上初めて、**単結晶氷の摩擦の異方性**を実験によって明らかにし、一般の物質間の摩擦機構とされる凝着説を当てはめたところ、無理なく氷の低摩擦を説明しことを知った。それと同時に氷の低摩擦機構としての摩擦融解・水潤滑説に疑問を懐くようになった。筆者は雪氷学の分野で育ち、摩擦の専門教育を受けた経験はなかった。しかし、氷の持つ特異性、たとえば、氷の剪断強さや付着強さが極めて小さいこと、氷のブリネル硬さが意外に大きいこと、氷は粘弾性体であり、小さな圧力下でも塑性変形が進み、氷と異物の間にも焼結という特異な付着現象、氷は蒸気圧が高く傷つきやすいことなど、従来の摩擦研究者にはなじみの薄い氷の特異性が筆者にはごく当然という特異な環境にいた。

筆者の実験結果は主に国内で発表され、雪氷に限定された国際会議に発表されたため、氷雪の摩擦機構としての凝着説は認識の乏しいものに留まった。国内での評価も両極端に二分された。その原因として従来の研究の問題点についての議論を避けてきたこと、研究成果を国民の知的財産として知らせる努力が不足していたこと、人類の知的財産としてまとめ上げる努力に欠けていたことが一因としてあったと反省している。

筆者は 1972 年日本で最初の冬季オリンピック（札幌大会）の前に、北大大学院生として低温科学研究所修士課程に入学、力学的性質に興味を持っていたことから、恩師吉田順五教授から「雪の摩擦」のテーマをいただいた。低温研には以前から雪の摩擦研究の伝統があり、藤岡敏夫先生が設備の整った低温実験室から真の接触面に着目した優れた研究など多数の成果を発表していた。また、繊細な実験技術を持つ小島賢治先生の雪の付着力に関する研究もあり、さらに遡ると中谷宇吉郎先生のスキーの実験もあった。

札幌オリンピックに関係した事前調査では右も左もわからないままスキー競技コースの調査補助をしていた。当時の自分は欧米人に劣等感を持っていて、日本のスキー場の雪質が悪いとか、スケートリンクでは氷の滑りが悪いなどと後ろ指を指されることを最も恐れていたように感じていた。なにしろ、国際会議などで海外に渡航する人はごく少数で、日本代表として出席するのであり、国際経験のある大学教員は少数に限られていた時代である。

筆者も研究者として駆け出しの身であり、オリンピックの意義を考えることなど思いもつかなかった。それから、26 年後の長野オリンピック(1998)では状況は一変していた。日本は急速な経済発展を続けた結果、外国との往来が頻繁となり、以前のような劣等感は払拭されていた。そして、国際的に名誉ある国になりたいと願うまでに成長していた。筆者は長野オリンピックを長年の氷の摩擦の研究成果を実行に移すチャンスととらえ、大きな単結晶氷をタイルのように敷き詰めた高速リンク(氷筍リンク)を提案した。この世界初のリンクとなる氷筍リンク導入に当たっては関西電力(株)による絶大なる支援を受け、日本スケート連盟から熱烈な支持も受けたが、開催地長野市の慎重論に押され、実現がオリンピックの半年後に遅れたことは日本にとって損失であったと思っている。

オリンピックに高速リンクを実現することは国際社会で名誉ある地位を占めることにつながり、国民に誇りと勇気を与えると思う。しかし、ここでの苦い経験がスピードスケートリンクの備えるべき条件として、日本人にあまり意識されなかった空気抵抗(空気密度)のもつ決定的な重要性を認識することになった。スケートと氷の間の摩擦係数が 0.004 程度と極めて小さいこと、氷の結晶面によって摩擦が変わることから、凝着説に確信を深

めた。そして、一般の人に対するスケートの低摩擦機構のわかりやすい説明を探求する過程で、摩擦融解・水潤滑説の内部矛盾に気づいた。つまり、水潤滑の実現には「氷を融かす熱」が必要であり、その熱は摩擦そのものによって供給されるのだから、「摩擦がある程度以上に大きいときに融け水が発生するのであり、摩擦が小さすぎれば水は発生できない」ことになる。摩擦融解・水潤滑説は「摩擦が大きいと滑りが良くなる(摩擦が小さい)」という矛盾した論理になっている。それにも拘わらず、摩擦融解・水潤滑説はその後「熱解析」を通して発展していったが、この理論に実際の真の接触面の大きさを適用すると、厚さがわずか 4nm 程度の水膜による潤滑を肯定したものになる。この水膜厚さの値は、一般に雪上、氷上には視認できるほどの深い摩擦痕が形成されることと矛盾している。真の接触面積の大きさや氷の物性を無視した論法は摩擦機構の議論に混迷を深めたといえる。

繰り返しになるが、筆者は長年にわたる氷雪の摩擦の研究を通して、摩擦融解・水潤滑説が氷の低摩擦の唯一の説明ではないと実感してきた。氷の硬さに比べ著しく小さい剪断強さや付着強さ、塑性、焼結、蒸気圧が高く傷つきやすい氷表面に注目すれば、凝着説によって氷の低摩擦が説明できるし、特に単結晶氷の摩擦で発見された氷の結晶面や滑り方位による摩擦の異方性は凝着説だけが正しい説明を与えることに確信を深めた。摩擦の基本に基づいた従来の実験結果の再検討、摩擦融解・水潤滑説の論理的矛盾の立証、氷雪の低摩擦機構として凝着説の確立を伝えることが本書の使命と考えている。

氷雪の摩擦研究を俯瞰して感ずることは、この研究に関与した科学者の思考・洞察が歴史的成果に強く拘束され、摩擦の基本や原点に立ち返っての吟味が疎かにされたこと、それらを克服することの難しさを痛感した。藤岡敏夫、小林禎作、単結晶氷の摩擦の先駆的研究に見られるようにわが国の研究は実験技術に優れており、今後もわが国から優れた成果が発表されることを願う、本書のメッセージがその一助になれば幸いである。

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	摩擦研究の始まり	4
3.	見かけの接触面積と真の接触面積	5
3.1	摩擦の法則, 摩擦の種類	5
3.2	固体表面の凹凸の計測と観察法	7
3.3	固体間の接触面積	10
3.4	電気抵抗による真実接触面積の測定	11
3.5	真実接触面積の測定	11
3.6	2平面の接触	13
3.7	摩擦面の温度への応用	14
4.	氷雪に関する初期の摩擦説	14
4.1	圧力融解・水潤滑説	15
4.2	摩擦融解・水潤滑説	17
4.3	その他の氷雪の摩擦説	19
4.4	一般の物質間の摩擦機構	22
4.5	低摩擦材料および氷に対する低付着材料	23
5.	スキーの摩擦特性	27
5.1	スキーの摩擦	27
5.2	スキーの力学	31
6.	スキーワックス	34
6.1	ワックスの効果	36
6.2	凝着説によるワックス効果の説明	38
	補足 ワックスと雪粒の摩擦、ワックスの硬さと測定法	39
7.	スケート	40
	補足 スケートの低速度摩擦	45
8.	雪上の摩擦	49
9.	単結晶氷の摩擦と氷上の摩擦機構	55
9.1	氷球と平滑面の摩擦(せん断の摩擦)	56
9.2	鋼球と単結晶氷(平板)の摩擦	57
9.3	凝着説の適用	71
	補足 A 単結晶氷の摩擦の実験装置	72
10.	氷の硬さと掘り起こし強さ	79
11.	氷のせん断強さと付着強さ	81
12.	プラスチック球面と水平板の摩擦	83
13.	摩擦が最小となる温度について	85
14.	摩擦融解・水潤滑説の発展	86

14.1	摩擦融解・水潤滑説を支持するイギリス・ヨーロッパ学派	86
14.2	滑走中のスキー底面に発生する水膜の厚さの測定	92
14.3	摩擦融解の実験と理論	95
15.	海水の摩擦	97
16.	雪氷路面における自動車のタイヤの摩擦の問題	101
17.	ころがり摩擦	103
18.	摩擦融解説の検討	103
18.1	摩擦融解説の内部矛盾	103
18.2	Bowden & Hughes (1939) 論文の吟味	105
18.3	Evans, Nye and Cheeseman (1976) 論文の吟味	107
18.4	Oksanen & Keinonen (1982) の論文の吟味	108
18.5	藤岡の論文の吟味	109
18.6	水潤滑の摩擦	110
19.	摩擦の関与する諸問題	113
20.	回転体と試験片の摩擦	115
21.	札幌オリンピック(1972)から長野オリンピック(1998)へ	117
22.	氷筍リンクの発展	121
22.1	次世代高速スケートリンク	121
22.2	カーリング	123
	特別講義 運動解析	129
22.3	スキーコースの雪粒の結晶方位の制御	131
22.4	短距離選手と長距離選手：速筋と遅筋の違い	132
22.5	冬季オリンピック競技（スピードスケート）の勘所	133
23.	氷雪の摩擦研究の系譜	136
	参考文献	137
	氷の摩擦に関する文献	138

著者索引

別冊 スピードスケート競技記録

スピードスケート世界記録の変遷	1
カルガリー(1988)オリンピックの記録	2
第54回国体 1999.1.29 (Mウェーブ, 氷筍リンク) の記録	3
長野(1998)冬季オリンピック (スピードスケート) の記録	4
ソルトレーク(2002)オリンピックスピードスケートの記録	6
トリノ(2006)オリンピックの記録	8
札幌(1972)オリンピックの記録	9
歴代冬季五輪開催都市と競技種目	10
単結晶氷の摩擦に関する実験データ	11

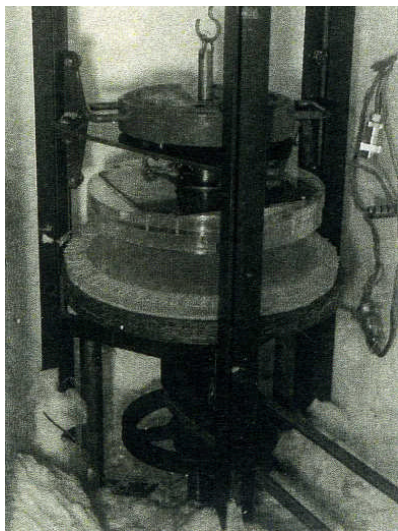


藤岡の実験装置(回転円板)

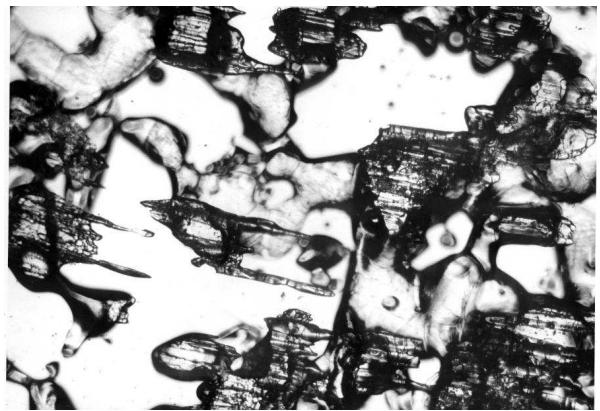


真の接触面の形成(藤岡)

回転ガラス円盤上の雪ブロックの滑り



氷円板と PMMA 輪との摩擦(対馬)  
融解再凍結により放射状ツララ発生  
(-20℃, 10m/s)



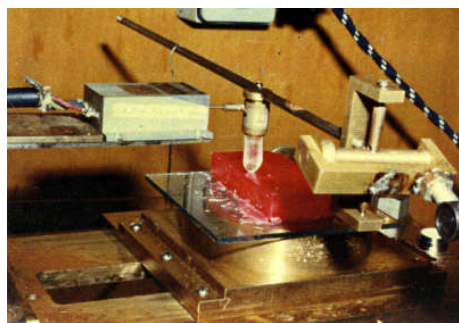
雪粒先端の融解再凍結で生じたツララ(藤岡)  
摩擦の大きい滑走面( $\mu \sim 0.3$ )では発熱が多くツララ  
が形成された(摩擦の小さい滑走面では融解像が認め  
られなかった。



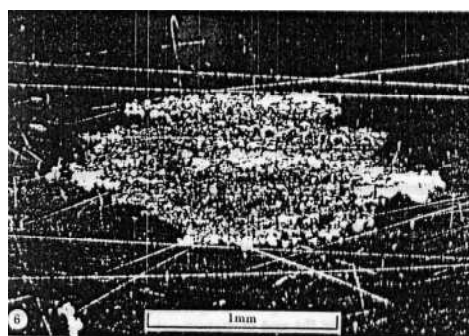
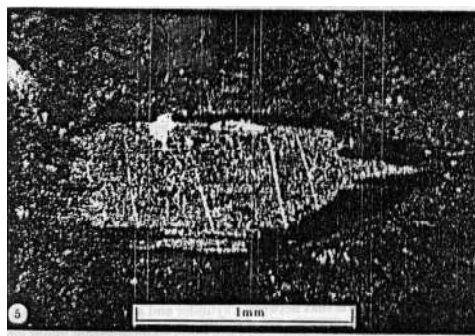
スキースキの滑走試験(飯山市、千曲川堤防道路) 滑走試験に使用された試作スキー(対馬)  
(日本スキー工業組合・スワロースキー(株)の支援を受けて実施された)





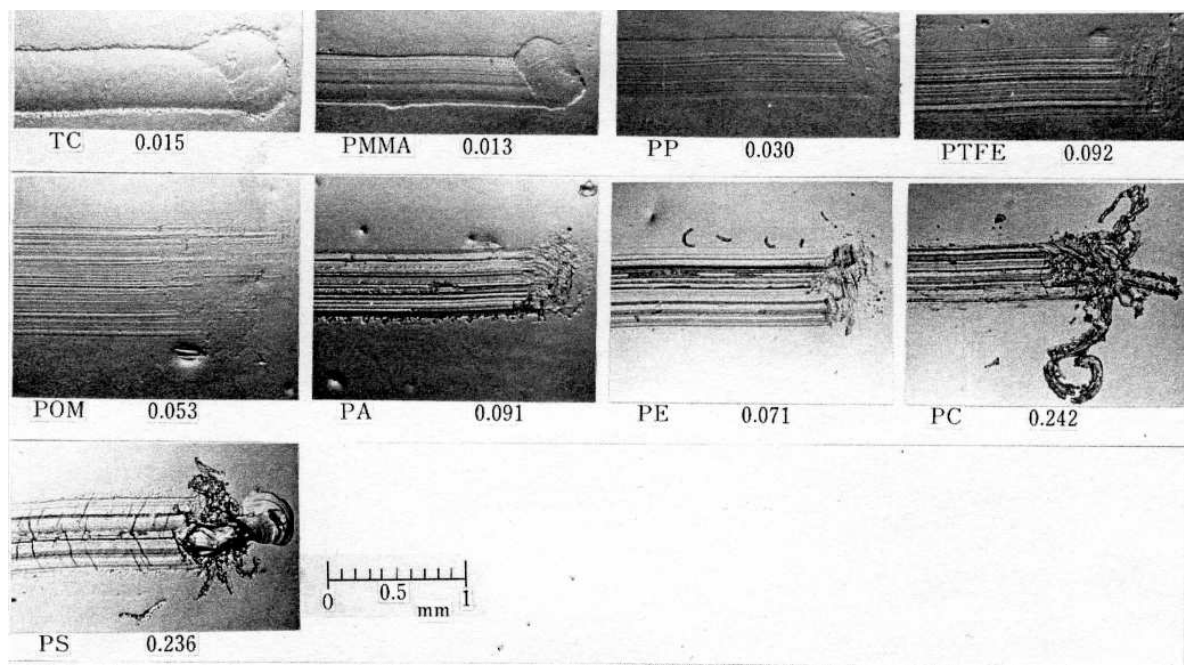


氷球面（雪粒先端）とスキーワックスの摩擦(対馬)



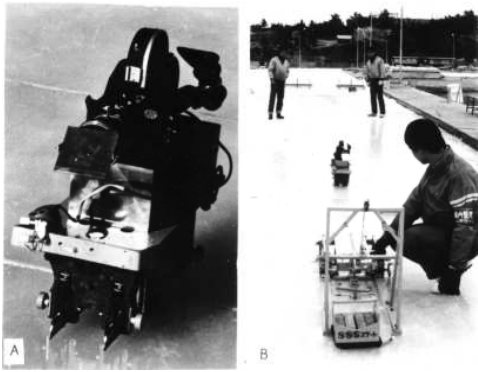
真の接触面 ⑤真鍮と氷の摩擦 ⑥アクリル (PMMA)と氷の摩擦

真鍮およびアクリル表面に煤をつけて氷との摩擦過程でできる真の接触面を見積もった(氷は左から右へ移動) (Evans ら)

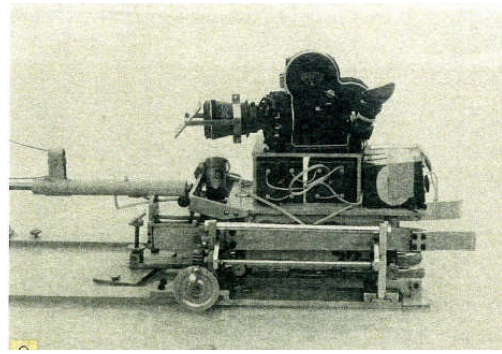


プラスチック球面と水平面との摩擦で氷面にできた摩擦痕(対馬)

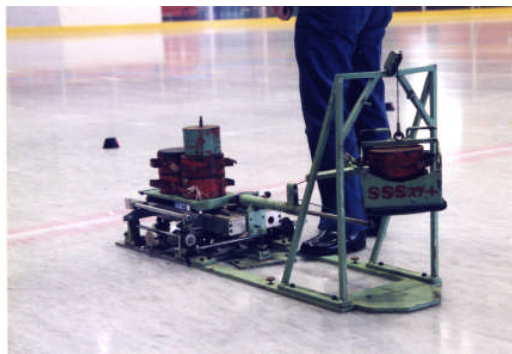
TC: タングステンカーバイド、PMMA: アクリル、PP: ポリプロピレン、PTFE: テフロン  
 POM: デルリン、PA: ナイロン、PE: ポリエチレン、PC: ポリカーボネート、  
 PS: ポリスチレン 図中の数値は動摩擦係数の値



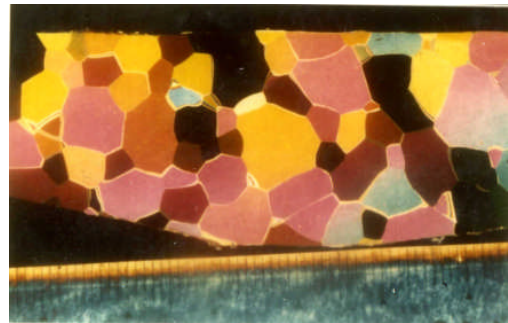
スケートリンクでのスケート滑走試験(小林)



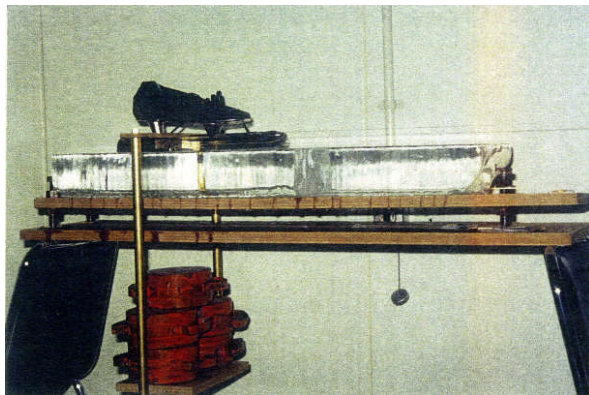
テストスケートの発射装置(小林)



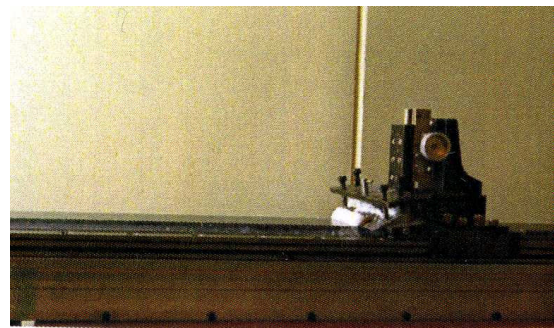
テストスケートの発射装置(対馬)



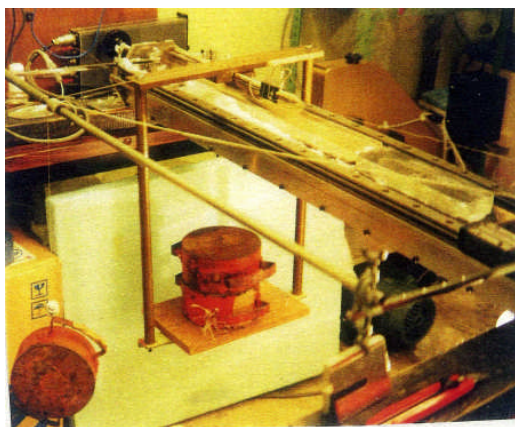
スケートリンク氷の水平断面(対馬)  
(エムウェーブ)



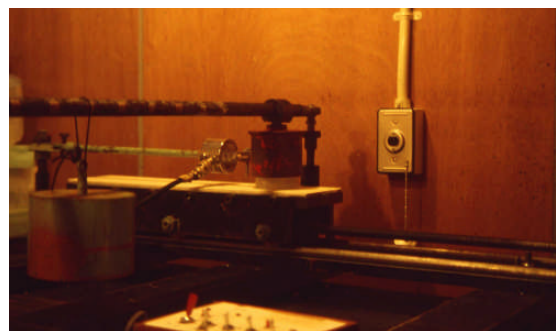
単結晶氷上のスケートの滑り(対馬)



スケートの摩擦測定のための  
マイクロームによる氷面作成(対馬)



高荷重での摩擦試験(対馬)  
コーナ部を模擬したスケートの滑り試験(対馬)

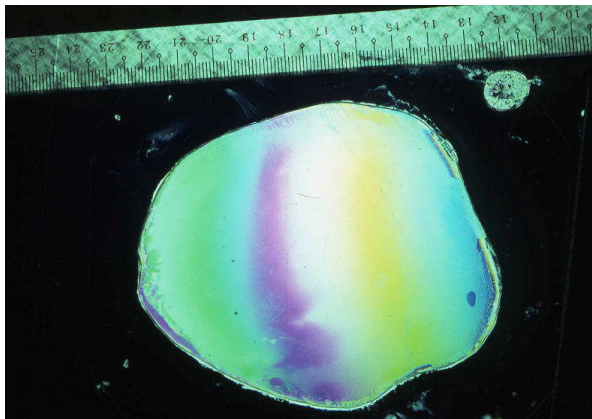




天然の氷筍



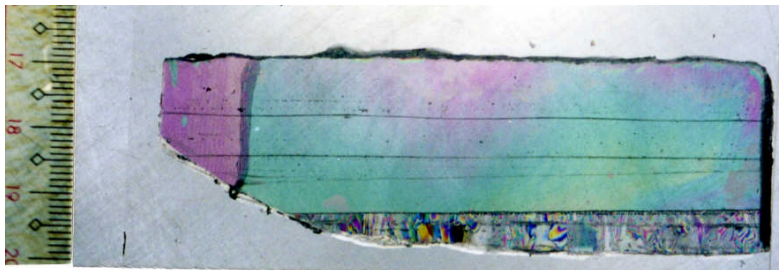
人工育成した氷筍(関電+対馬)



氷筍の水平断面



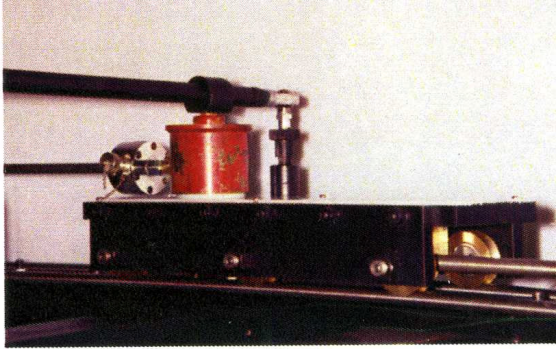
氷筍をスライスした氷[(0001)面貼り付けエムウェーブ(1998.9. 23)



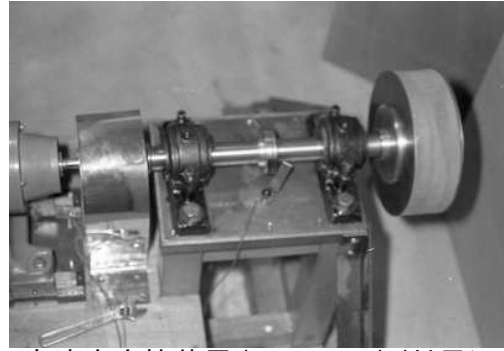
スケートリンクに成長した氷の鉛直断面(対馬)

(幾本もの黒い水平な筋は表面にできた霜の層の跡)

(40℃の温水散水(厚さ0.5mm程度)を繰り返すことにより、厚い透明氷が作られる。)



高荷重 (10~100kgf) 摩擦装置 (対馬)



高速度摩擦装置 (3600rpm) (対馬)



タイヤの摩擦試験 (中央が試験タイヤ)



試験タイヤ



砕氷船 (南極観測船「しらせ」)



ラッセル車 (プラウによる除雪)



ららぽーと室内スキー場 (長さ 500m、高さ 80m) ザウス



吸水性ポリマー雪を使った室内スキー場



トリノ・リンゴット(2006)イタリア



ユタ・オーバル(2002)高速リンク、米国



長野・エムウェーヴ(1998 オリンピック)



ショートトラック  
寺尾選手  
清水宏保 500m 金メダル  
(長野オリンピック)



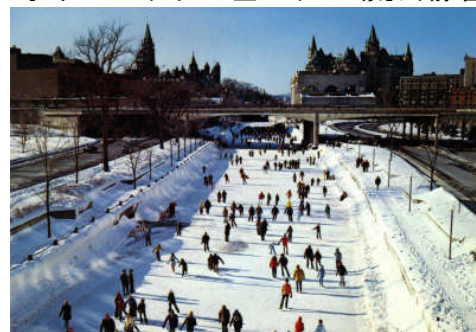
スピードスケートパシュート(団体)  
3人が一団となって滑ることにより一人で滑るより  
高速となる(最終走者のゴールタイムを競う)



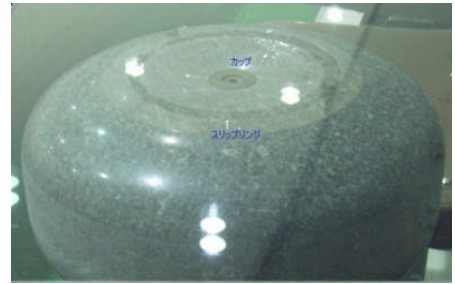
トリノオリンピックで金メダル(荒川静香)



スピードスケート 500m 競技



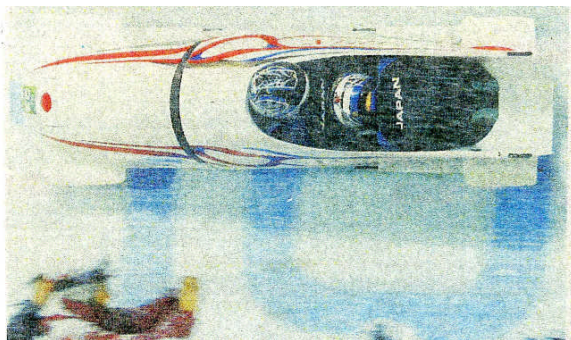
カナダ リドー運河  
凍結した河川はスケート場になる



ストーン滑走面のスリップリング  
(幅 5mm、直径 120mm 程度のリング)  
カーリング  
円 はハウス



カーリングの見所はストーンのカール、  
スウィーピングによる滑走距離の延長；  
衝突により相手ストーンを移動させ、  
有利な位置にストーンを止める技術、  
などであろう。  
(自転の方向(左回転か右回転か)により衝突の後の  
ストーンの運動が変わる)



氷の桶を高速で滑るボブスレー

ランナーと氷の間の摩擦は摩擦係数で  
0.006 程度と小さい。

## 1. はじめに

二つの物体が接触して相対運動を始めるときには力が必要であり、相対運動を続けている物体は摩擦抵抗を受けて速度を減衰していく。接触面には運動を妨げる作用が働いている。力学の分野では便宜上、接触面に運動を妨げる抵抗力が働くと仮定し、その抵抗力を摩擦力 (Frictional force) と呼んでいる (ただし、摩擦力という力は遠心力やコリオリ力と同様に実在する力ではなく、凝着や付着が抵抗となっていることに注意)。

相対運動の開始を妨げる力を静止摩擦 (Static friction) 力と呼び、運動中の滑りを妨げる力を動摩擦力 (Kinetic friction) (または運動摩擦力) と呼んでいる。

摩擦は紀元前から人類と密接な関係にあった。巨大なピラミッドや石像は大きな石を組み合わせて建造されたが、一個の巨石を運搬するには何十人、何百人もの力を合わせる必要があった。道がデコボコしていれば突起に妨げられ、あるいは溝にくい込んで動きが悪くなったであろう。地面に接する石の形状も動きに影響を与えたであろう。スムーズに移動させるために、搬送路を整備し、滑走路を平らにする必要があった。

やがて、石をソリに積むと容易に、しかも少ない人数ではこべることがわかったかもしれない。雨の降ったあと、雨上がりの濡れた道がすべり易いことも体験したことであろう。このような体験から滑走面に油などの液体をさしながら引くとさらに軽々と動かせることがわかるようになる。人類はいくつもの、ささいな体験を積み重ねて、より効率的に作業する知恵を身につけ、今日に引き継がれてきたのである。あるときは丸太に足をとられ、冷としたかも知れない。その体験を活かす人が現れて、そりの底に丸太を入れ「ころ」の働きをさせる。荷は何と軽々と動いたことか。やがて、「ころ」をもっと効率的に使えないものかと考える人が現れ、車輪の発明につながる。車輪はその後すさまじい発展をとげ、精密なベアリング (玉軸受け、ころ軸受け) を用いた新幹線鉄道の車輪や航空機のプロペラなどの回転軸に結晶化されていった。そこには紀元前から脈々と続いて来た技術と科学の積み重ねによる進歩を読み取れる。

ところで、われわれの身の回りは摩擦に満ちあふれている。人が道を歩き、階段を登るとき、安心して歩き階段を登れるのは足の底とこれらの中に充分大きな摩擦が働いているおかげである。スキー場のゴンドラやリフトを吊すロープ、エレベータや長大吊り橋のワイヤーロープも細いワイヤー同士の摩擦を活用して太く長いロープを構成している。

もし、道路がツルツルの油氷のようなものでできていたら、摩擦が小さすぎて安心して立つことも、自由に歩くこともできないであろう。自転車も自動車もタイヤと路面の間の摩擦が小さすぎたら、ブレーキを踏んでもスリップして、安全には止まることができない。自動車や電車も同じようにブレーキがきかない。こうなると、いたるところで衝突と混乱がおこり、車両も大破するにいたるであろう。そればかりではない。机や椅子が床の上であり、戸棚やタンスが床の上であり、本や食器が棚に収まっているのも摩擦のあるお陰なのである。摩擦がなくなれば机や椅子は低い方へ滑り出し、食器が滑り落ち、本も棚から滑り落ちてしまう。指の間に握られたボールペンや鉛筆、箸やスプーンも滑り落ちてしまう。このように考察を進めると、生活の隅々まで摩擦の恩恵が及んでいることに気づく。

摩擦がなければボルトやネジも効果を失い、ネジがゆるみ、釘が抜けてしまうから、多くの建物が崩壊し、機械などもバラバラになってしまうであろう。

釣り糸のナイロンの結び目が自然にゆるむことはよく経験することであり、衣服もほこ

ろんだところから長い繊維が引き出される。繊維間の摩擦がなくなれば結び目はゆるみ、ボタンが抜け落ち、背広やコートが肩から滑り落ち、衣服の繊維も一本一本がバラバラになって形を失ってしまう。

山から石が転げ落ち、氷河が目に見えて動き出し、あらゆる物体は低い所を目指して動き出す。山全体が崩壊し、地上は地獄絵と化す。さわぎがおさまった後の地球は一切の突起物がなく、まっ平、静寂の世界になるであろう。

このように見てくると、われわれの生活がいかに摩擦と密接な関係にあり、摩擦の恩恵を如何に多く受けているかを認識させられる。

摩擦を制御できないか？はじめに述べたように人類は紀元前から少しずつ摩擦を制御してきたのである。少なすぎる摩擦が悲劇につながることは今日社会問題となっている氷雪路面における自動車のスリップ事故からも類推できることであるが、一方、大きすぎる摩擦も障害となる。ふすまや窓の引戸が渋くなる（摩擦が大きくなる）と開け閉めするのに難渋する。サビついたランナーをもつソリも容易には滑らないし、スコップも雪との摩擦が大きいと投雪がうまくいかず、雪かきに難渋する。これらの困難を克服し、より小さな力で動かすためにワックスを塗ったり、表面に塗る塗装材料を工夫してきた。

今日、このような摩擦を扱う分野はトライボロジー（Tribology, 総合摩擦学）と呼ばれ産業や生活のあらゆる分野でトライボロジストが活躍している。たとえば、ジェットエンジンの主軸受けは外径 100 ~ 200mm の玉軸受けでできており、滑り速度は 160m/s (=580km/h) という猛スピードにさらされながら高い精度を維持している。

雪や氷は古来から摩擦の小さい物質として知られてきた。コンクリートや土や砂の上ではスキーもスケートも滑ることが難しいが、雪や氷の上では軽快によく滑る。この摩擦の小さいことが、スキー、スケート、ソリなどのウインタースポーツを可能にしていると言える。近年の研究によれば、氷とスケートの間の摩擦は地球上に存在する固体物質の中で最も摩擦係数が小さくなっている。一体、氷がそれほどよく滑る原因はどこにあるのだろうか？この氷の摩擦機構をめぐるには数多くの研究が行われ、いろいろの学説が出されてきたが、残念ながら未だ決着をみるにいたっていない。恩師から「結晶は神が作った。しかし、表面は悪魔が作った」といわれている、表面が関与する問題は難しいと教えられた。

古い著書で摩擦の巣であると言われる自動車は世界中で毎年 1 億台も生産され、毎日 10 億台もの自動車が動いていると記載されているのを讀んだ記憶がある。摩擦を小さくして燃料消費を 10 % 節約すると全体では 100 万 kW の発電所数 10 基分のエネルギーの節約になると言われる。[摩擦を減らすためにいたるところに使われる玉軸受けの多くは直径 0.3 ~ 12mm で、真球度 0.05 $\mu$ m 以内、表面粗さ 0.008 $\mu$ m 以下の高精度に仕上げられ、なめらかな運動と長い寿命、摩擦エネルギーの低減に貢献している。] 人類の消費するエネルギーの 3 分の 1 は摩擦に費やされているともいわれる。摩擦を減らすことは人類の消費するエネルギーの節約につながる。

一般に、摩擦は雪国の日常生活における雪と同様、厄介物の一つに考えられがちである。確かに、摩擦の大きいことは障害になることが多い。しかし、摩擦の無い世界を想像してみるまでもなく、適度の摩擦が与える恩恵は容易に理解されるであろう。

幸い、摩擦は地球上だけでなく、高真空の宇宙を飛行する船内でも、月や他の惑星においても存在し、人間の活動を助けている。それにしても、機械の精度を保ち、長持ちさせ



るには摩擦は小さい方がよい。そのため、摩擦を減らす努力は絶え間なく続いている。

本論の主題であるスキー・スケートの滑りを考えよう。多くの物体は自重の 1/2 程度の力で動くのに（摩擦係数は 0.5 程度）、スキーやスケートの動摩擦係数は 0.05 から 0.005 といわれる。通常の物体間の摩擦に比べスキー・スケートは 10 分の 1 から 100 分の 1 という小さな力で滑る。とりわけ、スケートと氷の摩擦係数は小さく、地球上に存在するあらゆる固体物質の中で最も小さな値となっている。

通常、雪や氷は融点に非常に近い温度にあり、その動摩擦係数が金属間における流体潤滑の値に近いことから、スキー・スケートの滑りは流体潤滑によると考えられた。ジョリー (Joly, 1886) の圧力融解・水潤滑説と F.P.バウデンら (英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所 Bowden & Hughes, 1939) の摩擦融解・水潤滑説はとりわけ有名である。

完璧と思われた摩擦融解・水潤滑説に対して、1950 年以降、矛盾する実験結果や疑問がいくつも提出され、最近では水が介在しない場合でもスキー・スケートはよく滑ると考えられるまでになった。

何故、スキーやスケートはかくもよく滑るのであろうか。この一見、簡単そうに思える問題が、実はこの 100 年来、絶えることなく論争の的となり、新しい技術を屈指した実験研究が試みられ、いくつも学説が提唱されながら未解決の問題として今日に到っているのである。近い将来、雪や氷に対する摩擦機構について最終的な結審の下されるのが待ち望まれる。

本章では初期の摩擦説を紹介するとともに、最新の研究成果の紹介を加え、一般の物質間の摩擦機構とされる凝着説でスキー・スケートの滑りを説明しうることを述べる。注目される低摩擦材料を紹介するとともに、スキーワックスの効果についての実験と考察を示す。単結晶氷の上に剛体球を滑らせる実験結果を詳しく紹介する。そこでは氷の結晶面によって摩擦が異なること、同一結晶面上でも滑る方向によって摩擦の異なることが示される。最後に、摩擦融解説の発展を実験、理論ならびに誘電測定による水膜厚さの推定を含めて紹介する。

オリンピックなどでのスキー・スケートの競技はスキー・スケートという道具と、それを操る競技者の技量・能力、および空気抵抗や雪面、氷面の条件が深く関与した勝負の世界である。どんなに優れた選手でも、よいスケートが与えられなければ競技に勝つことは出来ない。また、最高のスケートでも、氷のコンディションが不十分ならよい記録を産むことは出来ない。冬季オリンピックは「トライボロジー」そのものの競技という側面を強く持っているのである。本論では「よく滑るスキー」が備えるべき滑走面の条件を示し、滑走面として有望な材料とよく滑る滑走面の形状について言及する。よい滑りを与えるために、スケートリンクが備えるべき条件についての考察も示す。

冬季オリンピックの各競技は、スピード・スケートを除くと、純粋に勝負の世界である。そこではジャンプ競技の飛距離や滑降競技の滑走時間の意味は薄い。しかし、スピードスケート競技では歴代のタイムレコードが絶対比較され歴史的な意味を持つ。だから、世界記録を出すスケートリンクは高速リンクとして世界中から注目され、歴史に刻まれる。それは単に開催地の問題であるだけでなく、開催国の知性、開催国のトライボロジー技術が世界の注目する舞台で問われる瞬間でもある。

## 2. 摩擦研究の始まり

人類は荷物を引き始めたときから、摩擦の存在に気づいていた。摩擦という言葉もなく、摩擦をどう表現しどう説明するかは知らなかったかも知れないが、どうしたら摩擦を減らせるかは知っていた。

エル・バーシュ（紀元前約 1900 年）の洞窟の壁画には「そり」に乗った像の運搬が描かれているが、そりの前部には摩擦を減らすため通路に油を注いでいる人物が立っている。

紀元前 1400 年頃エジプトの墓で発見された二輪戦車では、車軸には当時の潤滑油が付いていたという。

テルミテイウス（紀元前 390 ~ 320）はころがり摩擦の方が滑り摩擦よりずっと小さいことを知っていた。また、運動している物体の運動を続けさせるよりは、静止している物体を運動させる方が難しいことも知っていた。

しかし、科学的な摩擦の性質の研究はほぼ 2000 年間なされなかった。15 世紀の中頃にはルネッサンスの天才レオナルド・ダ・ヴィンチ（1452 ~ 1519, da Vinci）が摩擦の基本となる二法則を導き出したが、これらはニュートンが力を明確に定義する 200 年も前であった。フランスのギュローム・アモンソン（1663 ~ 1705, Amontons, 1687 年温度計を創案, 1699 年摩擦に関する研究を発表）はダ・ヴィンチの手記のスケッチとほぼ同等の実験装置を組み立てて、摩擦に関する法則性を求める研究を行った。アモンソンの「摩擦力は面に垂直に作用する力に比例する」という第一法則はアカデミーに問題なく受理された。しかし、「摩擦は物体の形に無関係である」という第二法則はアカデミーに驚きと疑いの目で見られ、アカデミー上級会員のドラ・イール（1640 ~ 1718）にアモンソンの実験を追試して正しいかどうか確かめるよう命じたといわれる。

アモンソンは自分が使った表面は滑らかでないことを認識していた。彼の使った表面は肉眼でも粗いと思える表面であった。彼は摩擦は粗い表面のでっぱりの上にもう一つの粗い表面を押し上げる仕事か、突起部を変形させて押し下げのためか、でこぼこを削り取るために生じると考えた。それから 1 世紀の間ほとんどの科学者は、「摩擦は表面の粗さによる」というこの考えを受け入れていた。

イギリスの科学者ジョン・テオフィルス・デザグリエ（1683 ~ 1744）は摩擦の議論では表面の粗さが原因であるとする理論を取り上げて、表面を滑らかにすれば滑りやすくなるはずだが、「経験によると金属や他の物体の平らな面を磨き上げると摩擦が増加する」と指摘している。この一見矛盾しているふるまいの原因を、彼は接触している二つの面の付着によるとした。

同じような困惑はクーロン（1736 ~ 1806, Chales Augstin Coulomb, 1781 年摩擦に関するクーロンの法則を発表, この研究によりパリ科学アカデミー会員となる）の意識にも明らかに存在した。彼も付着の可能性を考えた。しかし、付着だとすれば、接触面積が 2 倍になると摩擦も 2 倍になるはずだと考えられるから、彼は付着の可能性を受け入れることができなかった。真実接触面という考えが確立し、真の接触面積が荷重に比例するという関係に気づくには、さらに長い年月を要するのである。

摩擦の法則が世界に注目され、実際の機械の設計に影響を与え始めたのはクーロン以降である。乾燥状態にある固体と固体の間に働く摩擦についてのクーロンの摩擦の法則は（1）摩擦力は垂直抗力（荷重）に比例し、みかけの接触面積によらない。

(2) 動摩擦力は滑り速度に無関係である。

(3) 静止摩擦力は動摩擦力より大きい。

というものである。

接触面積について、フランス学派の重要な貢献は、表面のでこぼこやざらざらの接触はとびとびの箇所では起こらないと強調したことであった。しかし、彼らはこのことは、はめ絵パズルの 2 個がぴったり合うように、でこぼこ同士が幾何学的にうまくかみ合うようだとみなしていた。接触面積は物体の全体の大きさによって決まり、重さには全く無関係になる。クーロンが摩擦の付着説を受け入れなかったのはこのためであった。クーロンの時代は知られていなかった弾性変形・塑性変形の法則にしたがって一つ一つのでっぱりが変形することが認識されたのはクーロンの時代から約 150 年後のことであった。

表面の微視的な形状、真の接触面積、真の接触面の変形等が明らかにされ、近代摩擦学が急速に発展するのは 1900 年代初頭から 1930 年代まで待たなければならなかった。

1930 年代に接触は表面の突起部で発生し、その真の接触面に全荷重が集中するために、突起は弾性変形領域を越え、塑性変形を起こして、分子間結合の生ずることが明らかにされ、摩擦機構としての凝着説が確立していった。

#### 摩擦とは何か

接触している物体を滑らせるには力が必要である。なぜ滑らせるのに力が必要なのかというと、摩擦があるからだ。摩擦力とか摩擦抵抗、摩擦抵抗力という言葉も何の疑いも持たずによく使われる。そこに困ったことが生ずる。というのは**摩擦力**とか**摩擦抵抗力**という用語が頻繁に使われすぎるために、摩擦力や摩擦抵抗力が**実在する力**だと勘違いされてしまうことである。トライボロジーの専門家の間でも牽引力の意味で摩擦力が使われることもあって、混乱のもとになっている。もちろん、牽引力と摩擦力は大きさが等しく、方向が反対という違いがあるだけだから、混同して用いても実際上の不便は殆どないのだが、後で取り上げるカーリングストーンの曲がりの議論のように摩擦現象に関する深い理解が必要な場面では重大な問題となる。

「**摩擦力**」は「力」がついているようにベクトル量であり、**大きさ**と**方向**がある。ところが摩擦力は独立ではなく常に運動と正反対の方向を向いている。摩擦力の作用とか、摩擦力のためと表現されると、摩擦力が独立した実在する力であるかのように誤解される恐れがある。摩擦機構としての凝着説に着目すれば、摩擦が発生するのは真の接触部においてであり、そこには凝着(付着)があるにすぎない。凝着部はどの方向に滑らせようと、凝着部が破断されなければ滑り運動は起こらない。そこに存在するのは凝着なのであり、凝着を剪断破壊するのが摩擦である。摩擦の大きさは牽引力に等しい。

### 3. 見かけの接触面積と真の接触面積

#### 3.1 摩擦の法則、摩擦の種類

二つの物体を接触させて相対運動を与えると、運動を妨げる方向に仮想的な抵抗力  $F$  が現れる。この仮想的な力を摩擦抵抗力といい、面に垂直な荷重の成分を  $W$  として、 $F/W$  を摩擦係数  $\mu$  と定義している。傾斜角  $\theta$  の斜面上に物体を載せて、斜面上方に引くと抵抗は斜面向下に現れ、斜面向方に引くと抵抗は斜面上方に働くように現れる。

運動を始めるときの摩擦を静摩擦といい、運動中の摩擦を滑り摩擦あるいは運動摩擦という。一般に静摩擦は運動摩擦より大きく、静摩擦や滑り摩擦に関する経験測（アモントンの法則，クーロンの法則，アモントン・クーロンの法則ともいう）として次の二つが知られている。

#### 摩擦の第一法則

「摩擦力は面に垂直に作用する力に比例する」

#### 摩擦の第二法則

「摩擦は接触面積によらない。摩擦は物体の形に無関係である」

上の法則の他に「静摩擦は動摩擦より大きい」，「摩擦は速度によらない」という関係を加えることもある。これらは経験則なので，摩擦の組み合わせや摩擦条件によっては法則に適合しない場合もある。

動摩擦係数に関する測定結果によると，表 1 に示されるように，多くの物質間の動摩擦係数は 0.2～1 の程度である。しかし，雪や氷に対するスキー，スケートの摩擦は 0.05～0.005 という桁違いに小さな値となっているのが注目される。このことが雪と氷の摩擦が問題とされてきた主たる理由となっている。

表 1 各種材料間の摩擦(摩擦係数は目安)

摩擦材料・摩擦条件	動摩擦係数 $\mu$
ブレーキ材とブレーキ・ドラム	1.2
乾いたタイヤと乾いた道路	1
濡れたタイヤと濡れた道路	0.2
銅とスチール（鋼）（乾燥）	0.7
氷と木材	0.05
スキーと雪	0.05
スケートと氷	0.005

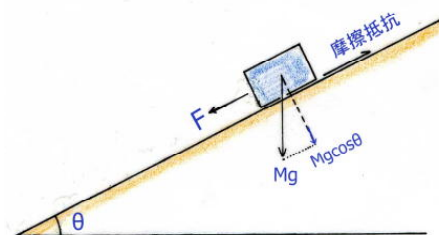


図 1 傾斜角  $\theta$  の斜面上の物体を斜面下方に引くときの力のつりあい

空気中におかれた金属の表面は純粋の金属原子が露出しているのではない。空気中の酸素と反応して酸化膜が形成され，空気中の気体分子も吸着している。このため，金属原子間の接触が妨げられ摩擦が減少する。通常の清浄面の摩擦はこのような状態の摩擦になっており，境界摩擦と呼ばれる。

一方，ワックスや薄い液体膜を塗られて表面間が隔離されるときは摩擦は著しく減少する。

しかし，高い真空中で固体間の直接接触を十分に行わせると摩擦係数が 100 というような異常に大きな静摩擦係数も測定される。高真空中で表面を高温に加熱して吸着膜を破壊し，さらに表面の酸化膜を除去してはじめて純粋な金属間の摩擦が可能になる。このような吸着膜のない面同士の摩擦を乾燥摩擦という。地球上では一般に乾燥摩擦状態は存在しない。

屋根材と積雪の摩擦の場合、静止摩擦係数が 1 (45° の傾斜上の積雪) を越えることもある。60° の急勾配の屋根に積もった雪の静止摩擦係数は 2 以上となる。道路標識など鉛直に近い板に付着した雪塊の静止摩擦は無窮大に近い大きさになる。このように積雪、雪塊の摩擦は著しく大きくなることもあるから、冰雪が広範囲の摩擦をもつ理由を説明できるように冰雪の物性を理解しておくことが必須である。

### 3.2 固体の表面の凹凸の計測と観察法

どんなに注意して磨いた面でも、表面には分子の大きさに比べてかなり大きな凹凸が残っているもので、ほとんどの場合、凹凸のある面同士で摩擦が行われる。たとえば、研削した面でも表面の凹凸を 0.01 ~ 0.10 $\mu\text{m}$  以内に仕上げることは難しいといわれる。このような表面の粗さを測定するのに使われる触針法、光波干渉法、電子顕微鏡、斜め切断法などを以下に紹介する。

#### (1) 触針法

調べようとする固体表面上に、細い針を滑らせて、針の上下動を拡大して記録し、表面の粗さを測るものである。針の先端には半径 2 $\mu\text{m}$  (=2 × 10<sup>-3</sup>mm) の丸みをもったダイヤモンド [触針] (図 2) が用いられる。

針の上下の動きを電氣的に拡大することで、縦倍率 40,000 倍程度が得られる。この測定法の長所は扱いが簡単で表面の凹凸が直接記録されることである。欠点としては触針の先端が非常に細かい傷や凹凸の底まで入り込むことが出来ないことである。一般に、実際の表面は極めて緩い粗さである。表面粗さ測定では粗さを強調するために横倍率に比べ縦倍率を桁違いに大きく (図 3) 記録している点に注意すべきであろう。表面粗さ示した図 3 では縦方向が横方向に比べ 1 万倍に拡大記録されている。

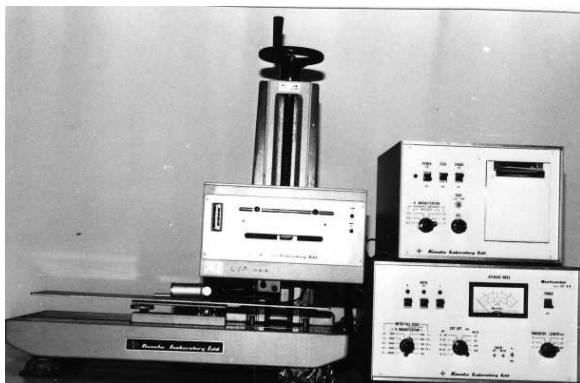


図 3 表面粗さの記録の一例

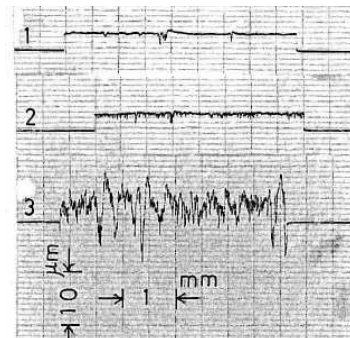


図 2 触針法

分子吸着法による表面積の測定によると、真の接触面積と見かけの接触面積の違いは 1 割程度以内であり、ほぼ等しい。記録紙上の激しい凹凸も、実際の表面の凹凸にすると傾斜角は非常に緩いものである。触針法では条件がよければ 0.025 $\mu\text{m}$  (2500nm) 程度の凹凸まで検出できる。ただし、氷は傷つきやすいから触針法は氷表面には適用できないであろう。

#### (2) 光波干渉法

光定盤の上に凸レンズをのせてニュートンリングを作る場合を考えよう。レンズの表面

を銀で薄く被覆すると、銀の反射率は 85 ~ 95 % と高いので、レンズと光定盤の間で反射を繰り返して、メッキしていない普通のレンズに比べ、鋭い干渉縞を生じる (Tolansky, 1948)。

この場合、被覆によって縞の位置は変わらないが、縞と縞の間の明るさの分布が変わる。単色光  $\lambda$  を用い、真上から見たとき暗い縞の見える場所では

$$\text{縞の位置は } m \lambda = 2nd \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

ただし、 $\lambda$  は光の波長、 $d$  は隙間の厚さ、 $m$  は輪の次数、 $n$  は隙間の媒体の屈折率である。レンズの曲率半径を  $R$ 、中心から隙間の厚さ  $d$  までの距離を  $r$  とすると、

$$r^2 = d(2R - d)$$

$d$  は小さいから、近似的に  $r^2 = 2dR$  (2)

(1) 式は  $m \lambda = n(r^2/R)$  隙間が空気の場合  $n = 1$  (3)

となる。ニュートンリングに比べるとリングの幅が狭く明るい。[極大の明るさの 1/2 までの明るさをもつ部分の幅は縞の間隔の 2 ~ 3 % と狭い。 $\lambda = 0.5\mu\text{m}$  の単色光では 250nm (=0.25 $\mu\text{m}$ ) の凹凸を検出できる。白色光を用いると 100 ~ 150nm の凹凸を検出できる。図 4, 5 は平滑な氷の上にガラスのレンズを押し当てたときに現れたニュートンリングを示している。奇妙なことに、レンズに加える力を大きくしていくと、中央が暗(図 4) → 明(図 5) → 暗(図 4) と交互に入れ替わった。

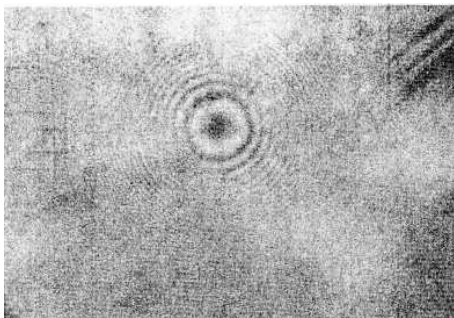


図 4 普通のニュートンリング

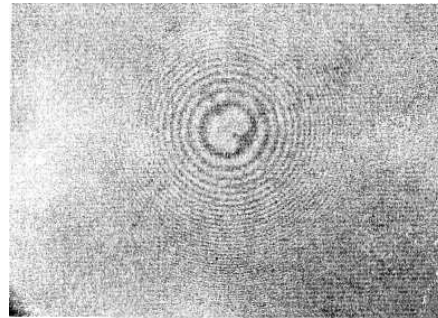


図 5 中心が逆転したニュートンリング

ニュートンリングの明暗の縞模様はどうしてできるのでしょうか

光(振動数  $\nu$ 、波長  $\lambda$ ) が物体 1 から物体 2 へ通過するとき波長  $\lambda$  は変わるが、振動数  $\nu$  と位相は変化せずそのまま進む。屈折率  $n$  は真空中の光の速度  $c$  と物体中の光の速度  $v$  の比  $n=c/v$  で定義されている。たとえば、氷の屈折率 1.31 は氷の中を進む光の速度が真空中(空気中でも同じ)にくらべ 24%減速することを意味する。物体中では光は波長が圧縮されるため減速する。隣接する 2 つの媒質(物体)を比較して **屈折率の大きい方を密な媒質、屈折率の小さい方を疎な媒質** という。

ところで、ニュートンリング形成に関係するのは**光が物体の表面で反射する際に波の位相が媒質の疎密の組み合わせにより変わる** ことに関係する。相対的に密な媒質中を通過してきた光が疎な媒質の表面で反射するとき、反射光の位相は変わらないが、逆に疎な媒質中を通過してきた光が密な媒質の表面で反射するときは反射光の位相が  $\pi$  (180°, 波長では  $\lambda/2$ ) 変わる。この二つの反射光の間で干渉が起こり強めあったり(明)、弱めあったり(暗)し、明暗の縞が生ずる。

### (3) 電子顕微鏡

電子顕微鏡は倍率が高く(10<sup>5</sup>倍)表面凹凸の高さを300nm程度まで測定できる。金やクロムのような重金属を真空中で加熱し、小さな投影角で試料に蒸着すると表面の小凸部に陰影がつくので、影の長さを観察することで突起の高さ、大きさが判別される。

試料は高真空にさらされるから、金属やプラスチック・スライダー表面の観察には適している。しかし、昇華蒸発による表面変形が著しく、電気絶縁性の高い氷の摩擦面観察には適当でないといわれてきた。

### (4) 斜め切断法

表面に平行すれすれの角度 $\alpha$ で試料を切断して、表面凹凸を強調して観察する方法である。cosec  $\alpha$ の値が縦倍率(深さ方向)と横倍率の比を与え、 $\alpha = 5^\circ 43'$ のとき10:1(つまり、凹凸の深さ方向の倍率が横倍率の10倍に拡大)になる。

図6のように横の長さを $x$ 、縦の長さを $h$ とすると、 $x \cos \alpha = h$ 、 $x = h / \cos \alpha = h \cdot \text{cosec } \alpha$ なので、倍率 $x/h$ は

$$x/h = \text{cosec } \alpha \quad (4)$$

摩擦によって氷の表面層には再結晶化やクラックが発生するから、それらの深さがどの

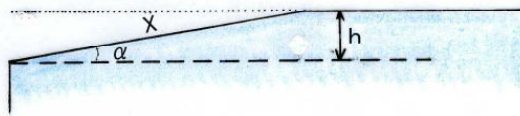


図6 斜め切断法

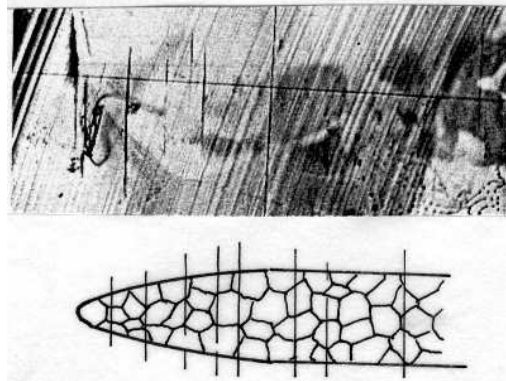


図7 斜め切断法で観察した氷の摩擦面

程度まで進んでいるか、再結晶粒の大きさなどを知るのに、斜め切断法は好都合である。

### (5) 反射型電子顕微鏡

反射型電子顕微鏡、走査電子顕微鏡では表面を直接見ることができる。ただし、この場合も電子顕微鏡と同様、試料は高真空にさらされること、氷が絶縁体であることから、氷の直接観察には使えないと思われた。氷の摩擦面を観察するには、摩擦試験後素早くレプリカを作り、その表面に金属蒸着して観察することになる。しかし、絶縁体である氷表面に電子線が照射されると、電子の帯電が生じ表面の観察ができないと信じられていたのである。実験的な試みが常識や思考を越えた結果をもたらすことは多い。既成の考えに捕らわれることなく実験により調べてみることに宿る利点といえよう。実際には生の氷表面が走査電子顕微鏡で問題なく観察されている。

### (6) 位相差顕微鏡 (Cuckow, 1949)

数1000nm (= 1 $\mu$ m)以下の表面凹凸状況を調べるのに良い。可視光の波長は0.3 ~ 0.7 $\mu$ m程度である。光の干渉を利用する位相差顕微鏡では可視光の1/10程度の微細な凹凸が識別される。

### (7) 原子を見る走査型トンネル顕微鏡

1981年 IBM チューリッヒ研究所の G.Binnig と H.Rohrer が発明し、1986年にノーベル賞を受けた。(このとき電子顕微鏡の発明者ルスカにも発明から50年後の1986年に同時にノーベル賞が与えられた。)

タングステンや白金の先端を一原子の大きさにする。一定の電圧をかけて試料表面から数10nmくらい上部に沿って走査していく。針と表面の距離が数100nm以下になると両者の間にトンネル電流が流れ出す。この電流は距離が短くなると指数的に増加する。10nmの変化に対し、電流は一桁も変化する。試料表面に原子一個分の段差があると、トンネル電流は3桁も変化する。この方法で10nmの分解能で試料が見えた。

以上各種の観察から固体の表面層は下図のように表される。

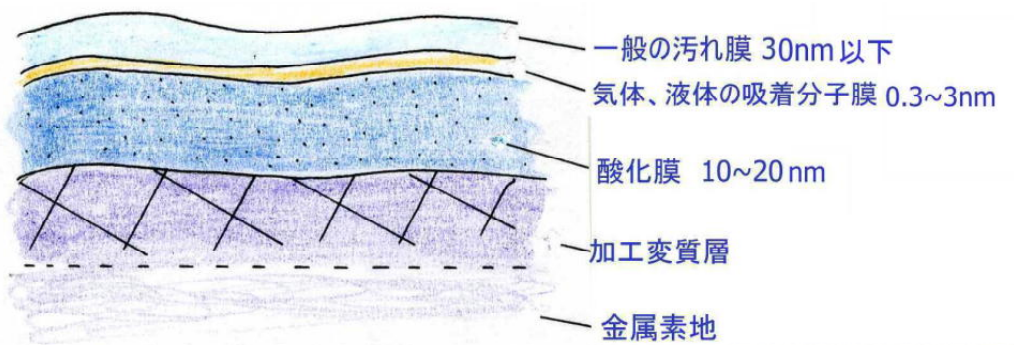


図8 金属の切断面の構造 (曾田範宗, 1971)

氷の表面がどうなっているかについては、温度や結晶面によって厚さの異なる薄い擬似液体膜によって覆われているとの見方が定着している。高温ではこの擬似液体膜に気体や汚れ物質の吸着あると思われるが詳細はわからない。鋸で切断した氷面、マイクロームで削った氷面を斜光で観察すると結晶粒毎に特徴のある表面模様が見える。しかし、一日も放置された氷面は光沢をもち微細な表面模様は消失している。

### 3.3 固体間の接触面積

平面と半径  $r$  の球面の接触(図9)の場合、荷重を  $W$  とするとヘルツ(Hertz)の弾性変形による接触のとき、接触円の半径  $a$  は、

$$a = 1.1[(Wr/2)(1/E_1 + 1/E_2)]^{1/3} \quad (5)$$

$W$  は荷重、 $E_1$ 、 $E_2$  はそれぞれ平面と球面のヤング率である。

接触面積  $A$  は  $A = \pi a^2 \propto W^{2/3} \quad (6)$

平均圧力  $P_m$  は  $P_m = W/\pi a^2 \propto W^{1/3} \quad (7)$

荷重  $W$  がさらに大きくなると、弾性限界を超える。

$P_m = 1.1Y$  弾性限界

$P_m = 3Y$  になったとき塑性変形が始まる(図10)。

塑性変形の際の真の接触面積  $A$  は

$$A = W/P_m = W/3Y \quad (8)$$

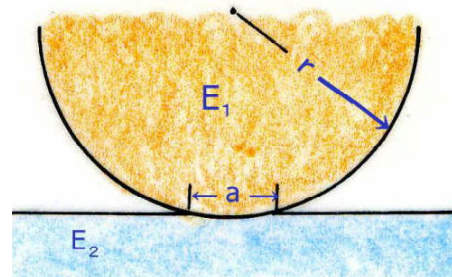


図9 弾性体の接触



表 2 弾性限界 Y, 平均圧力 P<sub>m</sub>, c=P<sub>m</sub>/Y

	Y, MPa	P <sub>m</sub> , MPa	c = p <sub>m</sub> /Y
テルル-鉛	21	61	2.9
銅	310	880	2.8
鋼	650	1900	2.8

P<sub>m</sub> = cY      c = 3      1MPa=0.1kgf/mm<sup>2</sup>

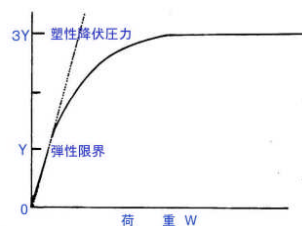


図 10 荷重と圧力

氷の場合、弾性限界や平均圧力（降伏圧力）は明確でない。それは、氷が粘弾性体であることによる。

### 3.4 電気抵抗による真実接触面積の測定

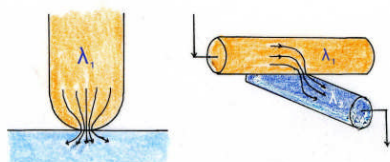


図 11 接触面を通しての電流の流れ      ことをマックスウエル(Maxwell,1873)が導いている。

導電率 λ    接触面半径 a    拡がり抵抗 (Spreading resistance) R    間隔が 50nm 以内ではトンネル効果でわずかに導電率をもつ 50nm 以上離れるとトンネル効果は無視できる。

2 枚の広い電極板を細い円筒導体 (図 11) でつないだとき、電流の拡がりに基づく付加抵抗は 1/4a λ になる

(氷は陽子半導体といわれ、わずかに電気を通すが、氷の分野では電気抵抗を用いた真の接触面の測定は行われにくいようである。)

実際の表面は酸化膜で覆われていたり、他の汚れた膜で覆われていたりしているので、それらの膜の示す抵抗が接触抵抗を支配する。一定の厚さの膜で覆われ、抵抗を 1m<sup>2</sup> 当たり

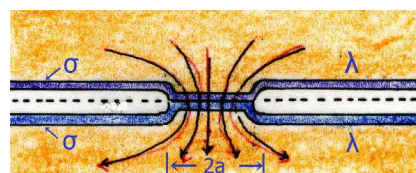


図 12 酸化膜のある場合の接触

(氷の表面にも空気中に存在する気体分子の吸着があるものと考えられるが、氷は金属やプラスチック材料と異なり、表面を削り落とすのは容易だが、薬剤等による表面洗浄が難しい。)

σ とすれば、接合部の合成抵抗は近似的に  

$$R = (1/2a \lambda) + (2 \sigma / \pi a^2) \dots\dots\dots (9)$$
 上の膜 :  $r_1 = \sigma / \pi a^2$       下の膜 :  $r_2 = \sigma / \pi a^2$   
 合成抵抗 :  $R = r_1 + r_2 = 2 \sigma / \pi a^2$

### 3.5 真実接触面積の測定

#### (1) 金属間の真の接触面

摩擦に直接関与する真実接触面積を求める方法にはいろいろあるが、ここでは以下の 3 つの方法によって測定された真実接触面積を述べる。

- ① 電気抵抗から求める方法
- ② 表面上に残った永久変形を顕微鏡で調べる方法
- ③ 金属の降伏圧力 P<sub>m</sub> から推定する方法    荷重 W = AP<sub>m</sub>

これらの方法によって決められた真実接触面積  $A$  の値はよくあう。真実接触面積  $A$  は表 3 に挙げたような材料では本質的に荷重と降伏圧力によって決まる。しかし粘弾性体である氷の場合、降伏圧力そのものが経過時間と共に小さくなっていく性質があり、接触の形態つまり球(氷)－平面，球－平面(氷)，平面－平面のどの摩擦形式によるのかによっても真の接触面積は変わる。

表 3 真実接触面積の測定 Bowden and Tabor (Proc.Roy.Soc.A169,1939)による

材質と接触形式	荷重 N	抵抗 R $\Omega$	真実接触面積 $A, \text{mm}^2$		
			Rから	観察から	$P_m$ から
銀 交叉円筒	5	$100 \times 10^{-6}$	0.02		0.02
	50	$30 \times 10^{-6}$	0.2		0.2
	500	$9 \times 10^{-6}$	1.8	1.9	2.0
	5000	$1.9 \times 10^{-6}$	15	90	20
鋼 交叉円筒	10	$1.0 \times 10^{-3}$	0.012		0.01
	50	$4.9 \times 10^{-4}$	0.061		0.05
	500	$1.6 \times 10^{-4}$	0.45	0.45	0.5
	5000	$4.9 \times 10^{-5}$	4.2	4.5	5
鋼 球面と平面	50	$4.5 \times 10^{-3}$	0.065		0.05
	500	$1.6 \times 10^{-3}$	0.45		0.5
	5000	$4.7 \times 10^{-5}$	4.5		5

## (2) 氷と平滑面の真の接触面

氷は金属と異なり、粘弾性体であり、塑性変形しやすい。藤岡は図 62, 66 の装置を使い、回転する平滑なガラス円板の上に底面積  $600\text{mm}^2$  の雪のブロックを滑らせて、摩擦終了後、ガラス板に接触させたままで取り出した。次いで、雪の隙間を液体のアニリンで満たし、そのまま温度を下げて、全体を凍結させた。雪試料はガラス板に密着したまま、空間を埋めたアニリンで補強される。金切り鋸でガラス面に平行に雪の上部を切り除く。さらに、ガラス面に残った雪を厚さ  $0.5\text{mm}$  程度を残して、カンナで削り取り除く。摩擦面は依然としてガラスに密着しているから、これを顕微鏡のステージに移動し、温度を  $-10^\circ\text{C}$  程度に上げて、補強剤のアニリンを溶かすと、ガラスに密着している雪の接触面が図 67 のように観察された。写真では真の接触面から伸びた小さなつららによって摩擦融解・再凍結があったことを示している。(アニリンを補強剤に積雪の内部組織つまり雪粒の形状、大きさ、結合状態を観察する手法として「積雪のアニリン固定法」が開発されていた。藤岡はその手法を積雪ブロックとガラス板の摩擦において形成された真の接触面観察に応用した。)

筆者は第 9 章補足に示した摩擦装置 (図 93) を用いて真の接触面を測定する試みを行った。まず、柱状の氷を真鍮のホルダーに凍着させる。氷試料の先端をカンナの刃で円錐状に切り込む。次いで、真鍮ホルダー一部を旋盤のチャックに挟み、 $-5^\circ\text{C}$  程度の高い温度条件下で、旋盤のでバイト (刃) で円錐状に削る。この試料を一晩、大型シャーレの中に

保存しておく、先端部が写真 13 のように球面状に変わった。

この試料のホルダー部を大型ピンセットで挟み、摩擦装置のユニバーサルジョイントから伸びたレバーにネジ留めする。レバーを移動して、平滑な試料板にのせ、一定時間接触させた後で摩擦を開始した。摩擦終了直後にレバーからホルダーを取り外し、顕微鏡のステージに移動して、氷先端（球面）に現れた接触面（真の接触面）を真上及び真横から観察した。図 13 の写真はその様子を示している。

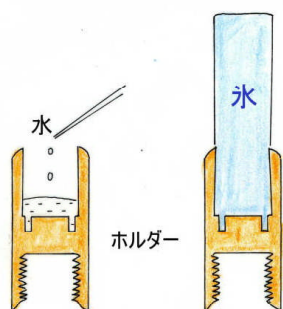


図 13 ホルダーへの氷の凍着

先端部が球面化した氷試料

氷の先端をカナの刃で円錐状に削った後、旋盤で仕上げる

この場合、摩擦材の表面がオプティカルフラットなガラス板のように鏡面状に平坦で平滑な場合には、氷の先端が塑性変形で広がりながら形成されるから、接触面は真の接触面に等しいと見なしてよいだろう。

ホルダーに凍着させる氷に単結晶氷を用いると、いろいろな結晶面について真の接触面を知ることが出来る。さらに、ホルダーをホルダー軸の回りに回転できるように細工したもの（図 93）では同一結晶面について、滑り方向を変えたときの真の接触面の違いを知ること出来る。

### 3.6 2 平面の接触

鋼面（研削後ラップ仕上げ）の接触（図 14）を調べた Bowden らの例を紹介する。

①面積  $80\text{mm}^2$  の組み合わせ

②面積  $2100\text{mm}^2$  の組み合わせ

両者で見かけの接触面の比 1 : 25 である。

しかし、接触面について得られた結果は

(1) どんな荷重でも 2 組の平板の接触抵抗はほとんど同一であった。

(2) どんな荷重でも、2 組の接触抵抗は交叉円筒についてえられた接触抵抗と同程度の大きさであった。

というものであった。

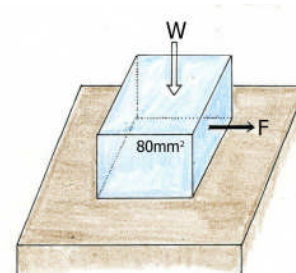


図 14 2 平面の摩擦

たとえば、面積  $80\text{mm}^2$  では荷重  $W$  が  $50\text{N}$  のとき交叉円筒の接触抵抗は  $5 \times 10^{-4} \Omega$ 、面積は  $5 \times 10^{-2}\text{mm}^2$  であった。面積  $2100\text{mm}^2$  の平板の接触抵抗は  $2.5 \times 10^{-4} \Omega$  であった（表 4）。

以下、接触円の半径  $a$  と接触点の数  $n$  を求めよう。鋼の電気伝導度を  $\lambda$ 、抵抗を  $R$ 、真の接触面積の総和を  $A$ 、降伏圧力を  $p_m$  とすると、

$$R = 1/(2an \lambda) \rightarrow na = 1/(2 R \lambda)$$

$$A = n \pi a^2 = W/P_m \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} n \pi a^2 &= \pi (na) a = \pi (1/2R \lambda) a = W/P_m \rightarrow a = (2 \lambda RW / \pi P_m) = 4.77WRn \\ &= (1/2a \lambda R) = (1/\lambda R) (\pi P_m / 2 \lambda RW) = (\pi / 4 \lambda^2 R^2) (P_m/W) \\ &= 1.39 \times 10^{-6} / R^2 W \end{aligned}$$

表 4 平面同士の接触における荷重と真の接触面積  $A$

荷重 kgf	重 kPa	$A = W/P_m$ mm <sup>2</sup>	真実接触面積 ／見かけの面積	$R$ 10 <sup>-5</sup> Ω	接触点 $n$	半径 $a$ , mm
500	5	5	1/400	0.9	35	21
100	1	1	1/2,000	2.5	22	12
20	0.2	0.2	1/10,000	9	9	9
5	0.05	0.05	1/40,000	25	5	6
2	0.02	0.02	1/100,000	50	3	5

### 3.7 摩擦面の温度への応用

上下の物体の導電率を  $\lambda_1, \lambda_2$  とすると、 $R_1=1/4a \lambda_1, R_2=1/4a \lambda_2$  である。電圧を  $2V$ 、電流を  $I$  とすると、オームの法則から  $2V=IR$  の関係があるので、上半分を考えると

$$I = 4a \lambda_1 V \dots\dots\dots (11)$$

の関係が得られる。

上の電気の流れは熱の流れに置き換えることができる。

電流  $I$  を真実接触面で発生する熱流  $q$  のうち上の物体に流れる熱流  $\alpha q$  に対応させ、電圧  $V$  を摩擦面の温度上昇  $\Delta T$  に対応させると、熱伝導率を  $k_1$  として

$$\alpha q = 4ak_1 \Delta T \dots\dots\dots (12)$$

同様に、下の物体に流れる熱流は  $(1 - \alpha)q$ 、熱伝導率を  $k_2$  とすると、

$$(1 - \alpha)q = 4ak_2 \Delta T \dots\dots\dots (13)$$

(12)、(13)式を辺々相加えると

$$q = 4a(k_1 + k_2) \Delta T \dots\dots\dots (14)$$

したがって、

$$\Delta T = 4aq / (k_1 + k_2) \dots\dots\dots (15)$$

上の(15)式は定常状態での摩擦面の温度を与える式である。これは摩擦面の最高温度の見積もりを与える。実際には、温度上昇過程で真実接触面付近の物質自体の温度上昇に費やされる熱があり、上式ほどには温度は高くない。

## 4. 氷雪に関する初期の摩擦説

金属やプラスチック等、通常の物質間の摩擦では自重の半分程度の力で滑らせることができる。つまり、摩擦力  $F$  を荷重  $W$  (表面に加わる荷重の垂直成分) で割った値で定義

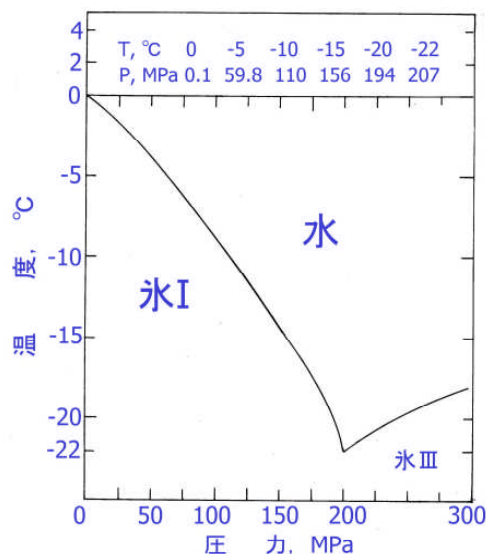
される摩擦係数  $\mu = F/W$  は 0.5 内外である。表面にワックスや油などを塗って滑りを良くすると、摩擦は 5 分の 1 の 0.1 程度まで減少する。その場合、ワックスや油が摩擦を小さくしているから、潤滑剤と呼ばれる。

スキーと雪面の摩擦は上の値よりさらに小さく、摩擦係数が 0.05 内外、スケートと氷の摩擦係数は地球上の固体物質間の摩擦としては最も小さく、0.005 内外である。特に、氷は地球上に現存する固体物質の中で最も小さな摩擦を示す物質の一つである。スケート・スキーが何故滑るかという問題は、「スケート・スキーと氷・雪面間の摩擦係数が他の物質間の値に比べなぜ極端に小さいのか」という問題と同じである。

#### 4.1 圧力融解・水潤滑説

スケートの滑りに最初に答えたのはイギリスのジョリー (Joly, 1886) 教授であった。ジョリーは水が凍って氷に変わるときに体積を増すことに着目した。この様な物質は、圧力を加えると融点さが下がるから、その時できる解け水がスケートと氷面間の潤滑作用をすると考えた。この考えは明快であるうえ、その後、同じ説をレイノルズ (Reynolds, 1899) が繰り返し、ケルビン (Kelvin) という大学者の理論的支持を得たので、スケート・スキーの滑りはこれでうまく説明できたと思われた。当時、氷河が下流に向かって動いていることが確認されたが、凹凸のある岩盤に囲まれた谷間を固体である氷がどのような機構で移動しているのかが問題であった。岩の上流側で氷に加わる圧力で氷が融けその融け水が岩の下流側に流れ込んで凍結する。この繰り返しのよって氷体が前進していくという氷河流動の復氷説が華やかだったことも時代背景として作用していたことであろう。

このジョリーの学説は後に圧力融解・水潤滑説と呼ばれるようになるが、圧力融解・水潤滑説を実際のスケートやスキーの滑りに適用するためにはスケートやスキーが氷や雪と接触する面の真の圧力を知る必要があった。いくつもの雪粒の先端が顕微鏡的なスケールでスキーの底に接しているわけであるが、雪粒が瞬間的に接触する面の圧力を測定することは不可能なほど難しい。そのことが、定量的議論の妨げとなり、スキーの滑りに対する様々の学説が出され議論の絶えない原因となっている。



圧力,  $10^5 \text{Pa}$  (=  $\text{kgf/cm}^2$ )  
 図 15 高圧下における水と氷の存在領域  
 (静水圧下では水の存在領域に下限温度がある。)

幅 70mm, 長さ 1.8m のスキーの底面積は 2 本で  $0.25\text{m}^2$ , これに体重 1000N の人が乗ったとしても, 接触面の平均圧力は  $4\text{kPa}(=0.04\text{kgf}/\text{cm}^2)$  に過ぎない。これでは,  $-0.0003\text{ }^\circ\text{C}$  以下の雪面上の滑りは説明できない。実際の雪面には空隙が多い。微視的に見るとスキーの滑走面も雪面も大きな凹凸を持っているため, 実際の接触面積はスキーの底面積より遥かに小さく,  $1/1000$  以下と思われる。いま仮に, スキー底面の 1 万分の 1, つまり,  $25\text{mm}^2$  が雪粒と実際に接触したとすると, 融点降下は  $-3\text{ }^\circ\text{C}$  となり,  $-3\text{ }^\circ\text{C}$  以上ではスキーと雪面間に水膜が発生し, 融け水が潤滑作用をしてスキーの滑りを良くすることが説明できる。

しかし, この時のスキーを支えている雪粒先端の圧力は  $40\text{MPa}(=4000\text{ トン}/\text{m}^2)$  となり, 氷のブリネル硬さ  $10\text{MPa}(=1,000\text{ トン}/\text{m}^2, -10\text{ }^\circ\text{C})$  をはるかに越えてしまう。 $-15\text{ }^\circ\text{C}$  の滑りを説明するためには圧力が  $200\text{MPa}$ , 真の接触面積はわずかに  $5\text{mm}^2$  となり, このような大きな圧力に雪粒先端が耐えうるとの仮定には疑問がもたれる。

圧力融解に対するもう一つの疑問として, 融解は圧力だけによって発生するのではなく, 温度の高い周囲から接触面に向かう熱流が伴って初めて可能になる(融解熱の供給によって融ける)という点がある。この熱の移動が有限の速さで起こることのため, 高速度の滑りでは熱の輸送が間に合うかどうか疑問が生ずる。たとえば,  $10\text{m/s}$  で滑っているスキーがある雪粒と  $10\text{mm}$  だけ接触して離れたとすると, その接触時間は  $1/1000$  秒であり, ほとんど瞬間的な速さで潤滑可能な厚さの水膜を作るのに必要な熱が接触している雪粒の内部やスキーから流れ供給される必要がある(図 16)。

しかし, 圧力融解・水潤滑説が否定される決定的な理由は, 高圧下における氷の研究からもたらされた。氷に加える圧力を増してゆくと, 融点は徐々に下がっていったが,  $211.5\text{MPa}(=2,115\text{ 気圧})$ , 温度が  $-21.5\text{ }^\circ\text{C}$  に達したところで最低温度を記録し, それより高い圧力に対して融点は逆に圧力の増加とともに上昇したのである(図 15)。

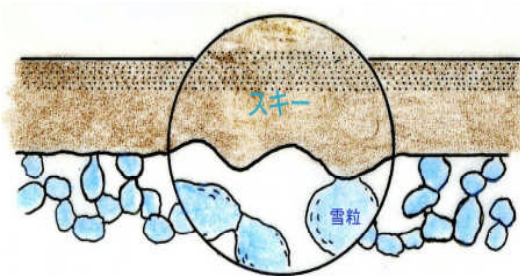


図 16 スキーと雪面の接触

#### スピードスケートの場合

スケートは幅  $1\text{mm}$ , 長さ  $400\text{mm}$  であるが, スケートは長さ方向にゆるく湾曲しているから, 実際の接触長さを  $0.1\text{m}$  とすると, 接触面積  $S$  は  $10^{-3}\text{m} \times 0.1\text{m}$  となる。荷重  $W=1000\text{N}$  とすると, 圧力  $P$  は  $10\text{MPa}$  である。この圧力による融点降下  $\Delta T$  は  $-7.5 \times 10^{-8}P = 0.75\text{ }^\circ\text{C}$  だから,  $-0.75\text{ }^\circ\text{C}$  以上の滑りは説明できても  $-0.75\text{ }^\circ\text{C}$  以下の低温の滑りを説明できない。

圧力融解で  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  の滑り説明するには, 氷の硬さを遙かに超える  $P=200\text{MPa}$  の圧力が必要になる。

圧力を加えたとき, 水と氷の存在できる領域を示す状態図(図 15)で, 水の領域に最低温度の存在することが解った。この温度以下では水は存在できず, スキーもスケートも滑らないはずである。しかし, 実験や経験でも  $-21.5\text{ }^\circ\text{C}$  がスキーやスケートの滑りを劇的に変えてしまうことはない(図 65)から, この説は否定された。

次に述べる摩擦融解・水潤滑と圧力融解・水潤滑の相乗効果の可能性については意外な結論が導かれる。摩擦融解によって溶け水と氷の摩擦面の温度が高くなるから, 相対的に温度の低い氷や雪粒の内部から水・氷界面への熱の移動ができなくなることをコルベック

(Colbeck)が指摘している。同様にスケートやスキーの内部から相対的に温度の高い溶け水に向かって熱が移動することもできない。つまり、摩擦融解・水潤滑の発生条件下では圧力融解は起こり得ないことになる。これら圧力融解・水潤滑説への疑問についてはColbeckが詳細に議論している。

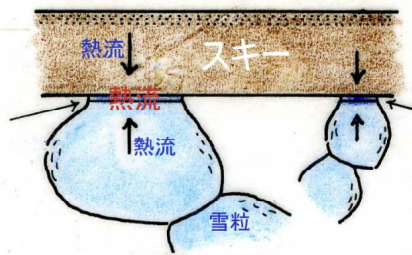
#### 4.2 摩擦融解・水潤滑説

圧力融解・水潤滑説が発表されてから40年後の1930年代は金属間の摩擦の研究が飛躍的に発展した時期である。この間に摩擦面における真の接触面積が見掛けの面積の1/1,000～1/100,000になること、摩擦過程で接触面の温度が金属の融点近くまで上昇することなどが明らかとなった。ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所のバウデン(Bowden)教授は当時の摩擦の研究成果を背景に、スキーの摩擦機構の解明に取りかかった。バウデンは金属間摩擦における「摩擦係数(表5)と摩擦形式」との類推から、スキーの滑りの原因を流体潤滑によると直観し、ジョリーの水潤滑の考えを受入れた。ただし、圧力による融解は極めて0℃に近い温度に限られるとし、解け水はむしろ摩擦熱で形成されると考えた。

表5 動摩擦係数と摩擦形式

固体間の摩擦(潤滑なし)	約0.5
潤滑膜をもつ金属面	0.1
流体潤滑の金属面	0.05

圧力融解説



摩擦融解説

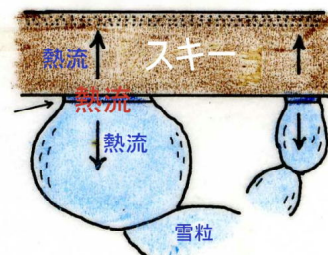


図17 圧力融解説と摩擦融解説

バウデンはこの考えを裏づける数多くの巧妙な実験を行った。実験はアルプスの氷河に掘られたトンネルの中に図18に示す装置を持ち込んで行われた。銅製の水平な円盤Cに氷や雪を凍り付け、滑走体Iを乗せて回転させる。カップLに錘をのせ、Zから細い糸が伸びて力を測定する板バネに結びつけられる。板バネにミラーを張り付けて、たわみをランプスケールの方法で読み取った。

回転円盤の空洞部にはドライアイスや液体窒素のような冷媒を満たすことが出来て、氷の表面温度を変えることができた。

摩擦面での滑り速度は30mm/sと4m/sであった。

得られた主な結果を要約すると次の通りであった。

1) 低速(30mm/s)では摩擦が大きく( $\mu_k = 0.3$ ), 高速(4m/s)では摩擦が小さい( $\mu_k = 0.04$ )。高速では雪粒の融解が発生し, 潤滑状態となり摩擦が小さくなった。

2) 温度が低くなるほど摩擦が大きかった。温度が低いほど発生する水の量が少ないと考えられた。

3) 荷重の大きいほど摩擦が小さかった。これは荷重の大きいほど発生する摩擦熱が多くなり, 潤滑の作用をする水膜ができやすくなるためと考えられた。

4) 熱伝導率の小さい材料ほど摩擦が小さかった。熱伝導率の悪いものほど摩擦熱が有効に氷の融解に用いられるから, 滑りやすくなると考えられた。

5) 接触角の大きい材料ほど摩擦が小さかった。接触角の大きい材料ほど発生した水を強くはじくから摩擦が小さくなると考えられた。

(4), 5)に選ばれた実験材料は少数であり, たまたま都合の良い結果がえられたのではないかという疑念が残る。)

バウデンら(Bowden & Hughes,1939)はこれらの実験結果から, 溶け水がなければ摩擦は大きく, 溶け水が発生すると摩擦が小さくなると結論を下し, その水は圧力によってではなく, 摩擦熱によって発生すると結論を下した。

これらのうち, 1)の結果が最も重要である。論文の中では完璧さを誇ったバウデンの実験結果に対し, 1950年以降, 支持する論文が数多く出された一方で矛盾する測定結果も報告されるようになった。

その主な結果を挙げると,

- 1) 摩擦融解の発生しない低速度のときでも高速のときと同じくらい摩擦が小さい。
- 2) 熱伝導率の大小と摩擦の大小の間には一義的な関係が認められない場合がある。
- 3) 水潤滑を促進するようにヒータで滑走面を加熱したソリを用いても, 加熱の効果は殆ど認められない。

これらのうち, 1と2はバウデンの実験結果と真っ向から対立するものであり, この1, 2が正しいとすると, バウデンの摩擦融解説の根拠は根底から崩れることになる。このような, 新しい実験事実を背景にスキーの滑りに関し次のような色々な学説が出された。

- 1) 雪粒のボールベアリング作用説(中谷,1936) 雪粒がスキーと雪面間でベアリング

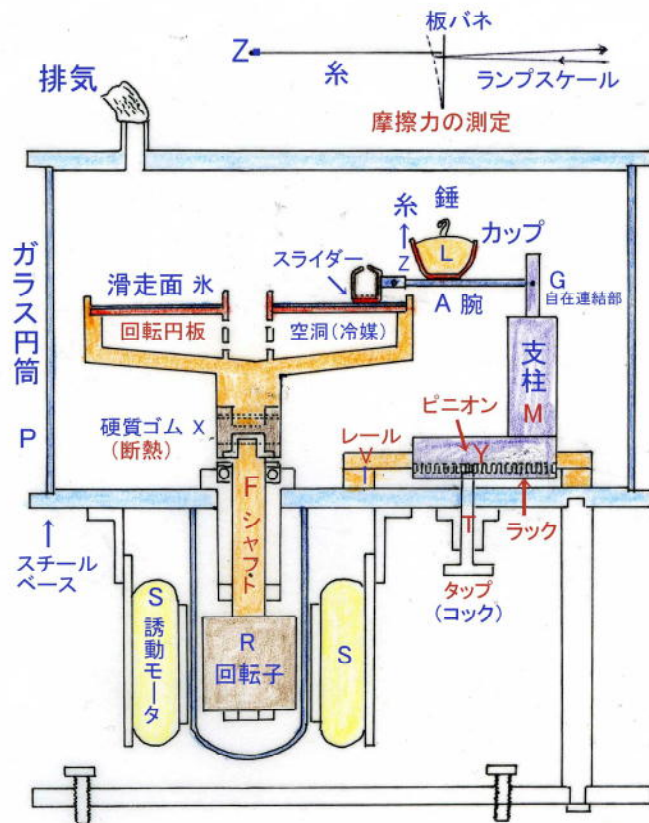


図 18 実験装置 (Bowden & Hughes,1939)



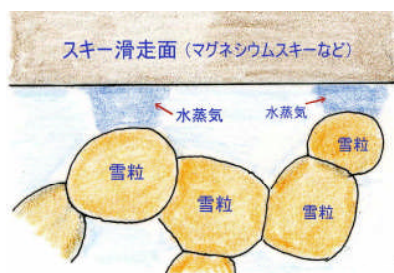
の作用をする。

- 2) 水蒸気潤滑説 (McConica, 1950) スキーと雪面間に水蒸気の膜ができて、水蒸気が潤滑作用をする。
- 3) 水分子回転説 (Niven, 1959) スキー・スケートと接触している雪粒表面の水分子が回転して、あたかもベアリングのような作用をする。
- 4) 低温癒着説 (藤岡, 1962) 滑走面と雪粒間の固体摩擦
- 5) 疑似液体膜潤滑説 (Weyl, 1951) 氷表面にある疑似液体膜が潤滑作用をする
- 6) 凝着説 (対馬, 1976) 滑走面と雪粒間の凝着

#### 4.3 その他の氷雪の摩擦説

##### (1) 水蒸気潤滑説

水蒸気潤滑説はアメリカのマコニカ (McConica) がアメリカスキー会社への報告書の中で提唱したものである。各種スキー材料の摩擦を調べた中で、マグネシウムスキーが最も良く滑ることを見出した。マグネシウム粉末は写真のフラッシュとして使用されたもの



であり、水と反応して閃光を発する。McConica はマグネシウムスキーの摩擦の小さい理由として、マグネシウムが接する雪粒の表面との間に水蒸気膜が発生して、スキー滑走面 (真の接触面) の一部が水蒸気膜を挟んで浮き上がると考えた。氷は金属に比べ蒸発しやすく、水蒸気圧が高いから、水蒸気の膜の上にスキーが浮き上がるとすれば、スキーの摩擦の小さい理由が

図 19 水蒸気潤滑 (スキーと飽和飽和) 説明される。

この McConica の考えは、高温の鍋やフライパンに落とされた水滴の下面が急速に加熱されるため、水滴下面から蒸発した蒸気流の反動で空中に浮き上がるのに似ている。鍋底と浮遊した水滴との間の摩擦は極めて小さいから、わずかな力で水滴は鍋底を動き回る。

同様の気体潤滑は金属板上に置かれたドライアイス (固体  $\text{CO}_2$ ) 小片の場合にも認められる。金属板で加熱されたドライアイス ( $-80^\circ\text{C}$ ) 下面から昇華蒸発により二酸化炭素ガスが噴射し、その反動 (反作用) で浮き上がる。ドライアイスと金属板の隙間が小さくなるほど昇華蒸発が促進されるから、ドライアイスの上下運動による振動音の発生することがある。

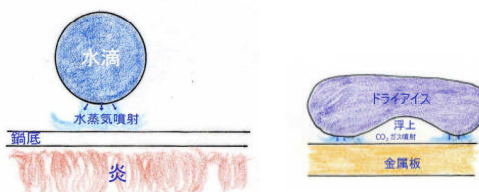


図 20 加熱鍋面の水滴 鉄板上や水面上のドライアイス

水面上にドライアイスをはかべたときは、ドライアイスが水面上を泳ぎ回るような運動をする。このときドライアイス下面と水との接触面は二酸化炭素ガスの薄い膜で隔てられている。水により熱せられた水との接触面に発生した二酸化炭素ガスが界面に溜まるためである。

McConica はスキーの場合も、スキー底面と雪粒間に発生する水蒸気膜の上に浮き上がるからスキーは良く滑ると考えたのである。しかし、スキーが水蒸気膜を挟んで雪面上に

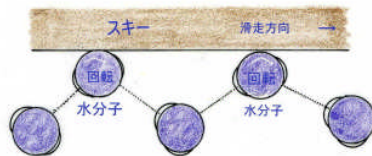
浮き上がるためには、雪粒表面から噴射する水蒸気の噴射力でスキーを浮き上がらせていると考えねばならないこと、そうすると、非常に大きな噴射量（蒸発量）が必要になる。このように考えると、先ず第一にスキーを浮き上がらせるほどの水蒸気の発生があるのかという疑問が生ずる。さらに、第二には雪粒先端を昇華蒸発させるための熱がどこから供給されるのかというのも問題である。材料の種類による摩擦の違い、速度による摩擦の違い、表面仕上げ状態の違いによる摩擦の違いなどスキーの摩擦に関する様々な特性をどのように説明するのも問題となる。

このような問題が含まれていたために、水蒸気潤滑説は大変ユニークな着想ではあったが、スキーの滑りを説明する学説としては認められることはなかった。

## (2) 水分子回転（コロ）説

ニーブン(Niven)は氷の摩擦研究をライフワークとしたカナダの物理学者である。ニーブンは氷の摩擦に及ぼす荷重効果、温度効果、速度効果、加熱したソリで加熱効果が認められないなどの多くの実験結果から、従来から有力とされた摩擦融解説には一貫して懐疑的であった。

(第2次大戦中英国のウイルソン首相により推進された氷山空母計画では氷にオガクズを混ぜてた強化氷(パイク委員長にちなんでパイクリートと呼ばれた)が考案され、その基礎研究が擬似液体膜の提唱者 Weyl, 地元カナダの氷物理学者ニーブン Niven を含めてカナダで遂行されたことが Niven の著書"The magic surface of ice"の著書に記されている)



ニーブンは氷の分子（水分子）の電子雲がほぼ球形に近いことに着目し、氷分子がボールベアリングのような働きをして、スキーやスケート、ソリの滑りを良くしているであろうという「rotation of ice molecules」という学説を提唱した。

ここでは氷表面に水膜も擬似液体膜の存在も仮定されない。「固体の氷表面」が小さな摩擦を与えると考えた点で画期的であった。もし、Niven が摩擦と氷の硬さ  $H$  や氷の剪断強さや氷の付着強さ  $S$  の関係に発展させていったら、凝着説にたどりついたと思われるのである。

Niven が摩擦融解・水潤滑説に疑問を抱き、折角、固体潤滑説を提唱しながら、なぜ一般の物質間の摩擦機構とされた凝着説に立ち戻れなかったのか？そこには、やはり、スケートやソリが余りによく滑ることから、何か滑りを良くする特殊なメカニズムが介在しているに違いないという束縛から抜け出せなかったことに一因があったように思われる。

温度低下による摩擦の増大は温度が下がるほど水分子が回転しにくくなるとすれば、定性的な説明がつく。しかし、摩擦材料による摩擦の違い、表面仕上げによる摩擦の違い、後で述べる氷の結晶面による摩擦の違いなどの説明が難しく、その後、支持を受けることはなかったようである。

## (3) 藤岡の低温癒着説

藤岡はガラス平板上に雪ブロックを滑らせ、滑走後の真の接触面を観察した。表面にある多数の雪粒先端から滑走の尾の方に向かって小さなつらが伸びるのを観察した。この

つららの発生は摩擦融解の証拠となるものであったが、藤岡は発生するつららの量（大きさ）が摩擦材料によって異なり、摩擦の小さいガラスでは単に雪粒先端に平滑面が現れるだけであったが、摩擦の大きい場合に顕著なつららが発生していることを認めた。はじめ

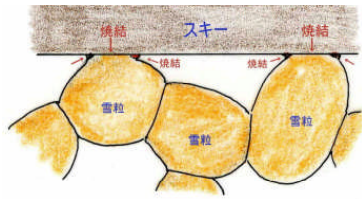


図 22 スキーと雪面の癒着

球面状をしていた雪粒先端の氷が溶けて、平らになったと仮定して、その融解のためにどれだけのエネルギーが費やされたかを推定した。その結果は、全摩擦エネルギーの数%という小さいものであった。ここで、藤岡は摩擦の主たる原因が摩擦融解にあるのではなく、他に原因があると考えた。以上の事実から、藤岡は摩擦融解説を全面的に受け入れることには懐疑的であった。

ある日には、一夜雪面に放置してあったスキーが翌朝には雪面にしっかりと凍り付いていたことに遭遇したこと、また、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ という低温でもアクリル板が雪面に強固に凍り付くことを経験して、藤岡は摩擦の原因として**低温癒着**の考えを持つに至った。しかし、スキーが雪面に固く凍り付いたことを、スキーが軽快によく滑ることの説明にどう結びつけるのかの探求には進まず、問題として残した。もし、藤岡が摩擦抵抗力の定量的説明に進んだなら、Nivenの学説の項で述べたのと同じように、凝着説にたどりついたと思われる。

藤岡は摩擦融解説の矛盾を示す現象をつかみ、さらには摩擦の真の原因の糸口をつかみ、そこに潜む深遠な真理の扉を開く直前まで進めた。

藤岡は速度  $V$  ( $10^{-5} \sim 10\text{m/s}$ )、温度  $T$  ( $-1 \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) を広範囲に変えた実験によって、摩擦係数  $\mu$  を表す、 $\mu - V - T$  図表を完成させた。この図表上で摩擦曲線に特徴的な三種の波形が観察されたことから、それらの波形の描かれる原因の探求に向かった。

当時、北大低温科学研究所では木下による積雪柱の圧縮実験が精力的に推進されており、圧縮速度  $V$  と温度  $T$ 、破壊強度  $S$  との関係図表が完成され、積雪の物理的性質が次々に解明されていった躍動期であった。木下は圧縮（定速度）過程での反抗力の曲線に着目して、図表を3区分していた。そのような時代背景もあって、藤岡の注目は摩擦曲線の特徴に向かい、図表上で摩擦を3分類し(図 65)、積雪の圧縮との類似性を強調していった。

#### (4) 疑似液体膜潤滑説 (Lubrication by quasi-liquid like layer)

ワイル (Weyl) は氷の表面構造を理論的に研究して、固体の氷の構造が表面まで露出しているのではなく、表面は固体の氷と液体の水の中間の構造をもった遷移層になっていることを導いた。そして、そのような遷移層に覆われていることがスケートやスキーの滑りがよい原因ではないかという考えを提唱(1951)している。

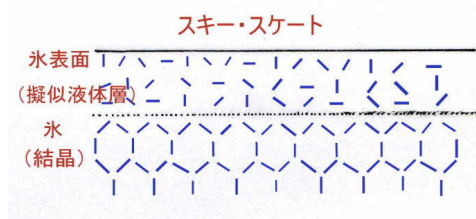


図 23 疑似液体膜潤滑

同様の考えを吉田が NHK ブックス「積雪の科学」(1972)の中でも述べている。吉田はそのうち誰かが疑似液体膜でスキー・スケートの滑りを説明する学説を言い出すのでないかと述べた。その予言は1999年アメリカワシントン大学のウエットラウファーとダッシュ (Wettlaufer and Dash) による「氷の表面融解 (疑似液体膜に同じ)」がスキー、スケートの滑りを説明するという主張となって現れた。

(摩擦抵抗が仮に流体層内の粘性から生ずるとすれば、その粘性係数として擬似液体層が妥当な値をもつのかどうかについては言及されていない。スケートの滑りではどんな摩擦機構に立とうと、真の接触面積の大きさは変えようがないということの認識が欠けていたと思われる。Bowden & Hughes の水潤滑に比較して擬似液体膜の厚さや粘性係数が桁違いに異なることについては一切言及されなかった。)

ここに登場する研究者は物理学者であり、摩擦の研究者ではない。疑似液膜の存在は氷と他物体との付着強さが小さい理由の説明には好都合な側面をもつが、複雑な摩擦現象、たとえば、8章で述べる同一結晶面上での滑り方位による摩擦の異方性などについては説明できないであろう。スケートの滑りでは氷上に視認できるほどの明瞭なシュプール(滑走痕)が形成されるのであり、滑走が表面の分子層オーダーの現象に留まらないことが見落とされていた。このような学説の主張は単に氷の特異現象の一つを強調するだけで、世間を惑わす知識の遊びの感をまめがれ難い。

#### (5) 凝着説(adhesion theory)

凝着説は対馬(1977)が単結晶氷の摩擦の異方性を定量的に説明するために導入したものである。その後、単結晶氷上の摩擦実験データを集積してスケート・スキーの低摩擦を説明するものとして提唱されていった。

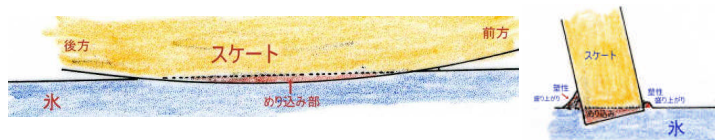


図 24 凝着説

凝着説は 1930 年代、主に金属の表面構造や接触など、摩擦に密着する問題が解明されていく中で、固体間の摩擦機構として確立されたものである。この凝

着説によると金属間の動摩擦係数  $\mu$  が 0.5 程度になることが理論的 ( $\mu = s/p$ ,  $s$  は弱い方の材料の剪断強さ,  $p$  は弱い方の材料の硬さ) に導かれ、金属間の凝着を示す多くの証拠も明らかになって、摩擦の基本的な機構として確立されたものである。

一般に凝着説は動摩擦係数が 0.5 程度の高い値を説明するが、スキーと雪面の 0.05 やスケートと氷面の 0.005 という小さい値は説明できないものと直観されてきた。だから、スキー・スケートがよく滑る理由として、二面間の凝着を弱める何らかの特別の潤滑機構があるに違いないと考えられ、各種の学説が提唱されてきたのである。

#### 4.4 一般の物質間の摩擦機構

接触する二つの物体間に相対運動を行わせると、動きと反対向きに働いて、運動を止めようとする力が現れる。この力が摩擦力である。接触とは二つの面が分子間力の作用をする距離まで接近することである。物質の表面というのはたとえ鏡面状に仕上げられたとしても、 $0.1\mu\text{m}(=100\text{nm})$  程度の凹凸は持っているのが普通である。つまり、表面というのは分子の大きさの数千倍という巨大な突起から出来ているわけで、接触はごく一部の突起の先端同士および突起間の咬み合いによって起こると考えられる。

接触の瞬間には真の接触面は極めて小さく、主として弾性変形によって接触する。その微小面積に全荷重が集中する結果、接触面の圧力は極めて大きく、その高圧力により接触面は水飴のように塑性的に拡大し、それにつれて圧力も減少し、ちょうど降伏圧力に達したところで面積の拡大が停止する。摩擦力は主として、この様にして形成された真の接

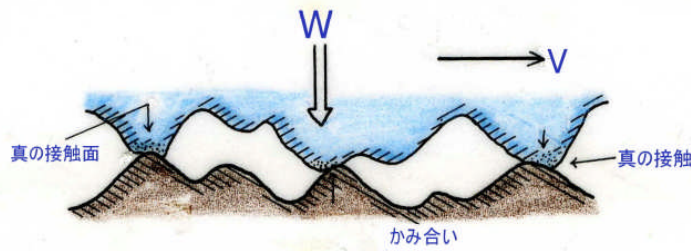


図 25 微視的似見た接触面の様子

触面をせん断の力によって破壊する力のことである。摩擦過程では真の接触面の形成と破壊が見かけの接触面上のあちこちで同時進行で無数に行われている。摩擦とは以上のようにして形成された結合部をせん断の力で破壊することであるとするのが凝着説である。

式で表わすと、二つの摩擦材のうち柔らかい方の硬さを  $P$ 、その掘り起こし強さ（つまり、硬い方の突起が柔らかい方の表面に食い込んで単位の断面積の溝を掘る抵抗）を  $P^*$ 、真の接触面のせん断強さを  $S$ 、接触面積を  $A$ 、咬み合いの面積を  $A^*$  とすると、摩擦抵抗  $F$  は

$$F = A \cdot s(\text{せん断抵抗}) + A^* P^*(\text{溝掘抵抗}) \quad (16)$$

である。摩擦係数を  $\mu$  とすると、

$$\mu = F/W = (A^* \cdot S + A^* P^*) / A \cdot P = S/P + (A^*/A) \cdot (P^*/P) \quad (17)$$

与えられる。一般に、 $A^*/A \ll 1$  である。

ここで最も大事なことは、金属やプラスチックの摩擦では  $S \approx P$  の程度なので、式(17)の第2項は無視されるが、氷(雪)の場合には  $S = 100P$ 、つまり、 $S \ll P$  となるので、第2項が無視できないという点である。金属やプラスチック間の摩擦では表面の粗さは摩擦抵抗にほとんど影響を与えることはないが、氷や雪の摩擦では表面の粗さを無視できず、摩擦抵抗が表面粗さに大きく依存することもある。

#### 4.5 低摩擦材料および氷に対する低付着材料

古くは黒鉛の摩擦の小さいこと ( $\mu_k = 0.1$ ) が知られ、潤滑材として使用されていた。二硫化モリブデンやテフロン（ポリテトラフルオロエチレン、PTFE）が大変小さい摩擦を示すことが注目され、近年ではこれらの固体潤滑剤を母材に埋め込んだり、焼結複合させて極めて小さな摩擦を示す材料も開発されている。ポリエチレンなどのプラスチック材に水素やヘリウムなどのイオンを照射して低摩擦材料を得る試みもある。一方、氷の付着については、着氷防止や摩擦の減少などを目的にした低付着性コーティング膜も盛んに開発された。

黒鉛は図 26 に示すように炭素原子が層状に配列した六方晶系に属する粉状物質である。炭素原子は水平面内の結合が強く、上下間の結合は弱い。潤滑剤としての黒鉛の摩擦係数は 0.1 の程度で、真空中では潤滑性を失う。このことから、大気中では層状をした黒鉛の層間に水蒸気の吸着が起こり、層間の結合を弱めて潤滑性を高めるが、真空中では吸着膜が剥離して摩擦が大きくなると考えられている。黒鉛はプラスチックに埋め込んで自己潤滑プラスチックとされたり、耐荷重性や耐摩耗特性を向上させるのにも利用される。

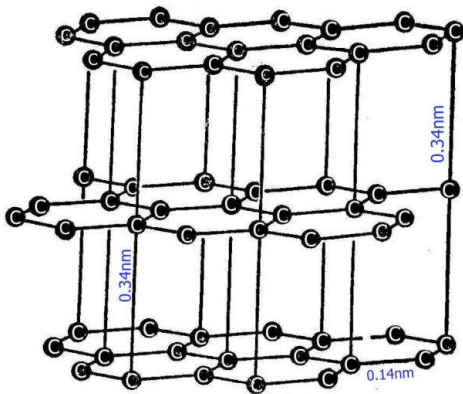


図 26 黒鉛の結晶構造と潤滑機構

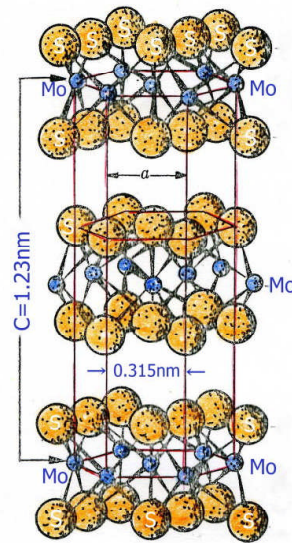


図 27 二硫化モリブデンの結晶

二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ , 図 27), 二硫化タングステン ( $\text{WS}_2$ ) も黒鉛と同じ層状構造であり, 六方晶形の物質である。これらの摩擦係数は黒鉛の半分程度でスキーやテフロンの値と同じである。二硫化モリブデン, 二硫化タングstenは潤滑剤として使用され, 黒鉛とは異なり, 湿った空気中では摩擦が大きくなる。

テフロン (四フッ化エチレン, PTFE, 図 28) は長い炭素のチェーンがその周囲のフッ素によって静電遮蔽され, テフロン分子同士の結合を弱めている。テフロンはフィルム状の微細組織を持つプラスチックである。このフィルムはテフロン

の表面から剥離しやすく, そのことがテフロンの摩擦の小さくなる理由とされている。つまり, テフロンの低摩擦はテフロン自身の内部滑りに原因がある。ガラス板上にテフロンを滑らせた跡を電子顕微鏡で観察すると, ガラスの表面に薄く広がったテフロンの膜が見られる。このことはテフロンの内部滑りを強く支持している。

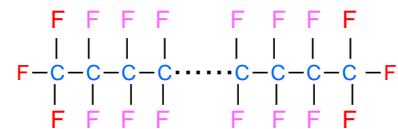


図 28 テフロン  
端の  $-\text{CF}_3$  が疎水性

テフロンの摩擦係数は空気中, 真空中のいずれにおいても小さく 0.05 の程度である。テフロンの分子量は  $10^7$  のオーダーで他のプラスチックに比べ格段に大きい。また, 他のプラスチックは球晶組織をもっている点もテフロンと異なる。スキーの滑走面に使用される高密度ポリエチレン (図 29) の分子量は  $10^5$  以下であるが,  $10^6$  のオーダーの大きな分子量をもつポリエチレンは超高密度ポリエチレンと呼ばれる。

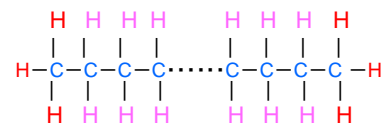


図 29 ポリエチレン  
端の  $-\text{CH}_3$  が疎水性

以上, 代表的な固体潤滑剤について述べたが, これらの潤滑剤と他の金属を組み合わせた超低摩擦材料が開発されている。津谷 (1955) によると, 銅の母材に体積比で 5 % の二硫化タングstenと 17 % の黒鉛を加えたもの, および銅-錫を母材として体積比で 11 % の二硫化タングstenと 10 % の黒鉛を加えたものでは, 空気中での摩擦係数が 0.08

～ 0.06, 真空中での値が 0.005 という驚異的な低摩擦を得ている。同様の超低摩擦はドウコフスコイ (Dukhovskoy ら,1976)により, ポリエチレン, ポリプロピレンに中性ヘリウムを照射して得られている。彼らはヘリウムを 2000 電子ボルトで加速, 直径 10mm のビームとし, プラスチックの表面から 10 $\mu$ m の深さまで注入させた材料で,  $\mu$ =0.002 という低摩擦を得ている。

スキーの低摩擦滑走面は, 氷に対する低付着材あるいはスキーの滑りが流体潤滑(摩擦熱によって解けた水膜の上を滑る)状態にある場合には滑走面材の疎水性が関与するであろう。

先ず, 氷に対する低付着という点ではポリシロキサン・ポリカーボネート共重合体(図 31)が注目される。ジェリネークら (Jellinek ら,1978)はこの重合体に微量のシリコンオイルを加えて, 氷に対し抜群の低付着値を得ている(米国 GE 社から LR5630 として市販された)。

水を強力にはじく物質, つまり疎水性の極めて強いコーティング材としてはベロックス 140(Vellox140, Clifford Estes 社)またはトラノックス(Tullanox, 図 30)が注目される。これは接触角が 140 $^{\circ}$  と高く, 表面が多少汚れても接触角の劣化が少ないという利点がある。摩耗に弱いという弱点を持つものの, 完全に水をはじくという点では抜群に優れている。同様の超疎水性材料にはトラノックス 500(接触角 138 $^{\circ}$ )がある。トラノックスは Tulco 社から市販され, 粒径 0.007 $\mu$ m(=7nm)の微粉末である。

筆者等が氷を滑走体としてテストしたもののの中では, ネオフロン(四フッ化エチレン・六フッ化プロピレン共重合体), PMMA(アクリル,Dianal BR-80), エポマリンなどのコーティング材が摩擦係数 0.02 と小さかった。

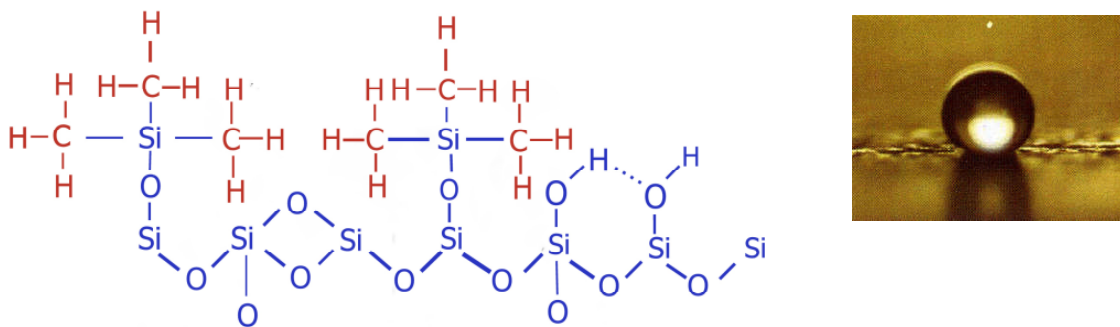


図 30 トラノックス (超疎水性材料, 接触角 138 $^{\circ}$ )

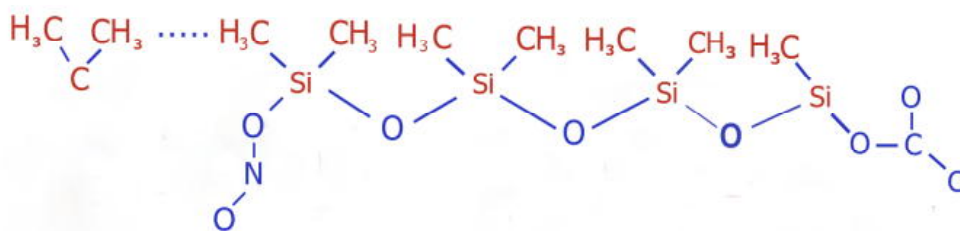


図 31 氷に対する低付着材 (ポリカーボネート・ポリシロキサン共重合体)

上記のコーティング材ではメチル基 ( $\text{CH}_3$  -) が疎水性を与えている。トラノックスやベロックスでは  $\text{CH}_3$  - 基 3 個が Si から伸びていて超疎水性を形成していることが解る。

$\text{CH}_3$  基は水素原子が 3 個も外側にある。にも拘わらず、水分子との結合が弱く、疎水性となることに不思議さを感じない人もいようであろう。上のトラノックス (ベロックスも同じ) は水素で護衛され、水に対して超疎水性となっているといえる。

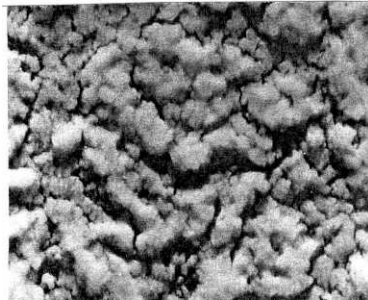


図 32 ベロックス 140

左の写真 (図 32) はベロックスを塗った鉄板の表面である。表面は粗い面になっている。蓮の葉の疎水性のようにこの粗さも高い接触角を作り出すことに寄与しているであろう。ベロックスは摩耗しやすく、指で軽くこするだけでも、指先に白い粉末がかすかに付着し、この指先は超疎水性となる。

超疎水性という点でスキー滑走面材への適用が望まれるわけであるが、本書「海水の摩擦」で述べるように、摩耗性が災いして著しく大きな摩擦を与えるのは意外であった。

一般に、スキーにワックスを塗ることでスキーの滑りは改善される。その際の、ワックスの効果はワックスが水をより強くはじくことによると説明している解説書が多い。しかし、これは著しく安易な説明であり、あとで再度述べるように、鵜呑みにするのは危険である。タイムを競うスキー競技で何故ワックスを塗ると滑りがよくなるのかについて、誤った知識に基づいてワックスを選択しているという懸念はないのだろうか。

氷上・雪上の滑り低摩擦機構についていくつも学説が提案された。この問題に対してはいろいろに自問し自己問答を繰り返して強靱な論理を構築していくことが大事である。いろいろに自問し、考え抜くことで理解を深め、現象の根底に潜む真理に迫っていくことが大事であり、それは Yes/No の判断を通して論理を構築していく西欧風の思考方法だけでなく、歴史の初期まで遡って真理を吟味する東洋的思考手法も兼ね備えるべきである。氷雪上の摩擦機構の問題は矛盾する全ての成果を混沌の釜に入れて、真偽を再判定し、真理の深奥に迫るといふ東洋の思考方法にかなっているように思われる。



## 5. スキーの摩擦特性

### 5.1 スキーの摩擦

スキー滑走の際の抵抗を藤岡は

- ①スキーのアーチベンドが雪をかき分けて進む除雪抵抗
  - ②スキー底面と雪面間の摩擦抵抗
  - ③スキーやスキーヤーが受ける空気抵抗
- に分けている。

このうち、除雪抵抗と底面の摩擦抵抗を合わせて、単にスキーの摩擦抵抗という。スキーヤーに加わる空気抵抗の存在のため、低速度領域を除くと、摩擦抵抗の直接測定は困難である。よく行われる測定方法は既知の勾配をもつ様な斜面上の二点における速度を測定し、スキーヤーとスキーを一体とした系の運動方程式をたててスキーと雪面間の摩擦係数を求めるものである(図 33)。この場合、スキーヤーの形状と滑走方向への投影面積とからスキーヤーの受ける空気抵抗を推定している。

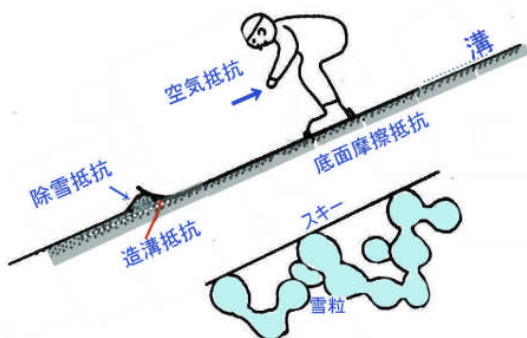


図 33 一様な斜面上のスキーの滑走

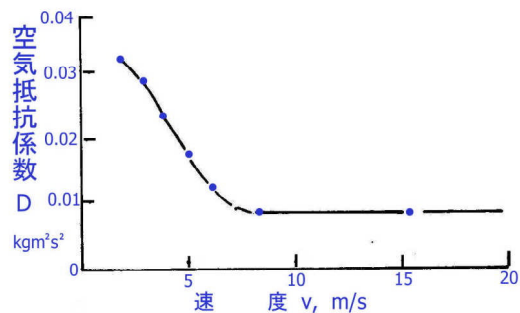


図 34 D と速度 V との関係

スキーとスキーヤーの総質量を  $M$ 、点 P、Q での速度を  $V_p$ 、 $V_q$ 、PQ 間の距離を  $l$ 、スキーヤーの滑走方向への投影面積を  $A$ 、空気抵抗係数を  $C$ 、空気の密度を  $\rho$ 、斜面の傾きを  $\theta$  とすると、スキーと雪面間の摩擦抵抗  $\mu$  は、

$$(1/2)M(V_p^2 - V_q^2) + Mgsin\theta \cdot l = \mu Mg \cdot \cos\theta \cdot l + (1/2)\rho ACV^2 l \quad (18)$$

より、

$$\mu = [(1/2)M(V_p^2 - V_q^2) + Mgsin\theta \cdot l - (1/2)\rho ACV^2 l] / Mg \cdot \cos\theta \cdot l \quad (19)$$

で与えられる。

$$(1/2)\rho CA = Dg \quad (20)$$

として、D と速度 V との関係を求めたのが図 34 である。ただし、スキーヤーを円柱状と仮定し、 $\rho = 1.29\text{kg/m}^3$ 、 $A=0.420\text{m}^2$  とした。

図 35 には速度を 8 ~ 21m/s に変えたときの摩擦係数の変化が示されている。長さ 2.15m の競技用スキーで、ポリエチレンの滑走面にワックスを塗ったものと、塗らないものが示されている。速度が 15m/s 以下では摩擦係数が 0.02 ~ 0.05 の小さな値を示すが、21m/s では 0.07 ~ 0.12 まで増大している。テストされた速度範囲でワックスを塗ったものはワックスを塗らないものより摩擦が小さく、ワックスの潤滑効果が認められる。

屋外斜面での滑降テストでは、雪質やそのほかの条件を変えずに、温度だけを変えるのは

難しいのであるが、図 35 には温度を  $-1.6 \sim -2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  の範囲における測定の結果が示されて

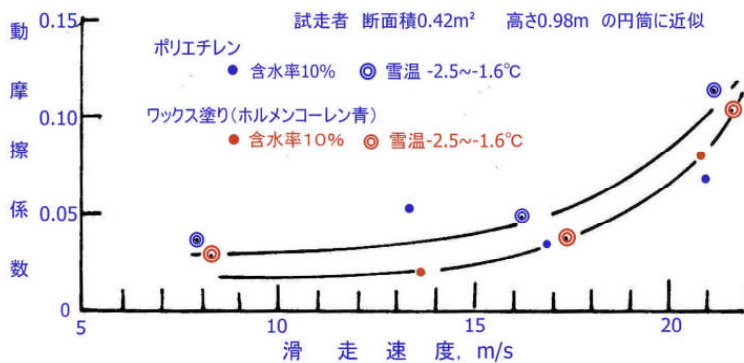


図 35 スキーの摩擦係数の速度・温度特性 (黒岩ら,1969)

いる。 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下のものと、 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上のものを比べると、 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上では摩擦係数が 0.05 程度の小さな値であったが、温度の低い方では摩擦係数が 0.08 程度まで増大した。これらの図では、摩擦面の融解可能性が最も高い  $20 \text{ m/s}$  での摩擦が予想に反して著しく高くなっていることも注目される。テストスキーヤーの空気抵抗は速度の 2 乗と姿勢に比例する。空気抵抗の見積もりが小さいと、スキーと雪面間の摩擦係数が逆に大きく見積もられることになる。スキーと雪面間の摩擦を計測するには藤岡 (1954) の方法をスケート滑走における摩擦測定に発展させた Koing, Groot, Ingen shenau (1992) の方法をスキーの摩擦計測にフィードバックさせることが望まれる。

### (1) スキーの低速度摩擦の測定結果

低温室に長さ 6m の直線状の雪面を用意した。雪面は密度が  $200 \sim 350 \text{ kg/m}^3$  のしまり雪を 0.8mm のふるいにかけて均一に堆積させ、時々雪面を平らにし、上から平らな板を押し付けて圧密した。この雪面上にスキー (一本) をのせ、 $30 \sim 630 \text{ N}$  の荷重のもとで一定速度で引くときの力をロードセルで検出し記録した。雪面温度は  $-17 \text{ }^{\circ}\text{C}$  であった。図 36 に示す方法で測定された速度 0.1, 2.0, 40mm/s での結果を表 6 に示した。

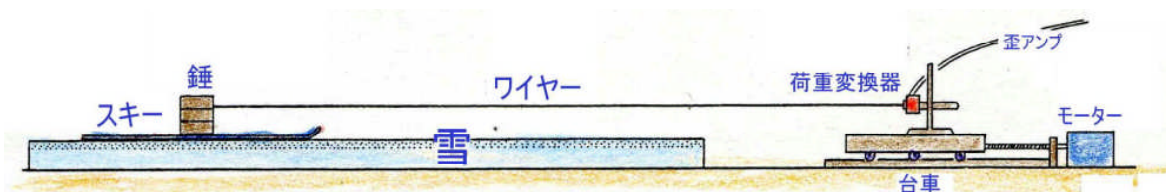
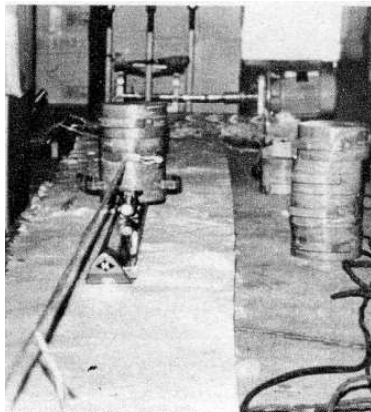


図 36 低温実験室におけるスキーの低速度摩擦の測定法

表 6 スキーの低速度摩擦の測定結果  
 (荷重 30 ~ 630N, 温度-17 °C, スキーの長さ 2.15m, スキーの構造 MGsW)

	速 度, mm/s			滑 走 面 材
	0.1	2.0	40	
463-3	0.041	0.034	0.043	スライデックスミリオン
678-4	0.059	0.036	0.046	P-TEX1000
678-6	0.073	0.07	0.079	P-TEX V
730-1	0.045	0.035	0.045	P-TEX-V
730-5	0.064	0.044	0.085	長谷川 P-TEX#2000
751-32	0.085	0.073	0.097	P-TEX Super DH
770-33	0.073	0.052	0.079	P-TEX V
456-1-1	0.081	0.067	0.091	ステンレスリード+ SC87 コーティング
456-1-2	0.082	0.066	0.071	ステンレス+ SC87 コーティング
	0.115	0.060	0.078	ポリエチレン
		0.050	0.090	ポリエチレン (広溝スキー)

表 6 でスキーの摩擦係数は 0.03~0.1 のあいだにあり, -17 °C という低温, 秒速 40mm 以下という低速度のため摩擦融解は関与しないと思われるにも拘わらず小さな摩擦係数が得られていることが注目される。

**(2) スキーの高速度摩擦の測定法**

スキーの高速度摩擦の測定法の一例を図 37 に示す。巻き取り機のついた直流モーターでステンレス・ワイヤーを巻き取る。ワイヤーの端にはロードセルのついたハンドルがあり, これをテスト・スキーヤーが握っている。ロードセルで検出される抵抗力は歪みアンプで増幅された後, 直接データレコーダに, あるいはテレメータを介してデータレコーダに記録され

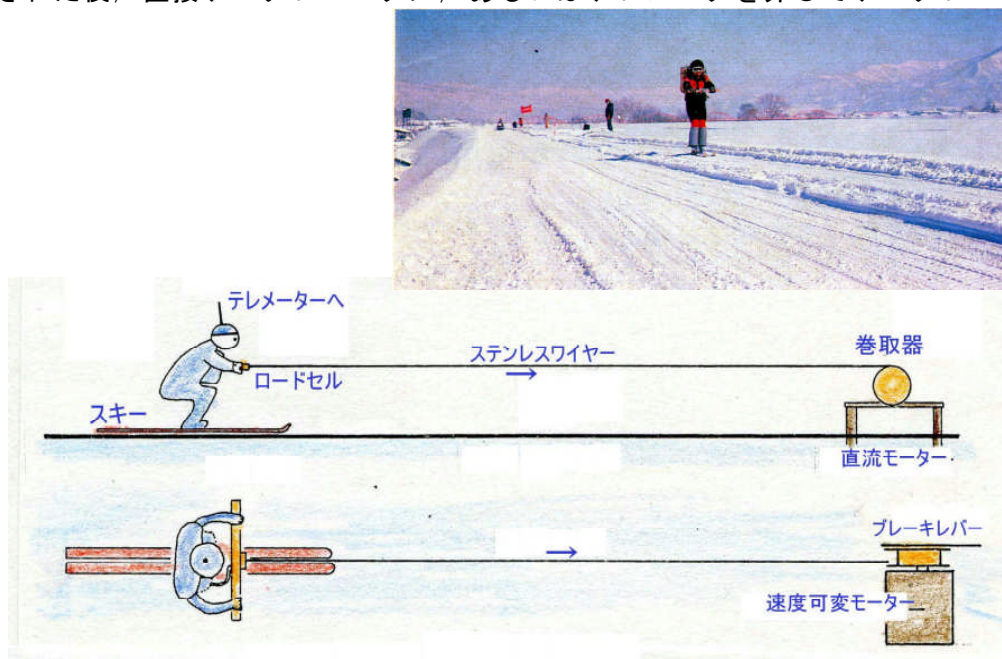


図 37 スキーの高速度摩擦試験

る。直流モータを使えば速度を毎秒 3m 程度から 20m 程度まで変えることができる。

図 37 では速度可変の直流モータ (2.2kW) に取り付けられた巻き取りドラムにステンレスワイヤーが巻き取られていく。助走・停止などの安全性を確保するためにテストコースとして長さ 200m 以上の直線コースが必要である。スキーヤーは電氣的な荷重変換器のついたハンドルを持ち、牽引力 (摩擦力) の信号がテレメータで受信装置に送られたり、スキーヤーの身体につけたデータレコーダに記録される。

本試験では ND-4X, ポリフロン, ダイヤナールなどの低付着膜を塗装したジュラルミンを貼りつけたスキーについて試験した。スキーの滑走機構に凝着説が当てはまるとすれば、①硬い滑走面と②低付着面を供えたスキーが理論的によく滑ると考えられたからである。スキーヤーが受ける空気抵抗を含めて摩擦抵抗として決定された値が表 7 に示されている。(空気抵抗分を差し引いたものがスキー底面の抵抗ということになるが表 7 にはその補正は行っていない)

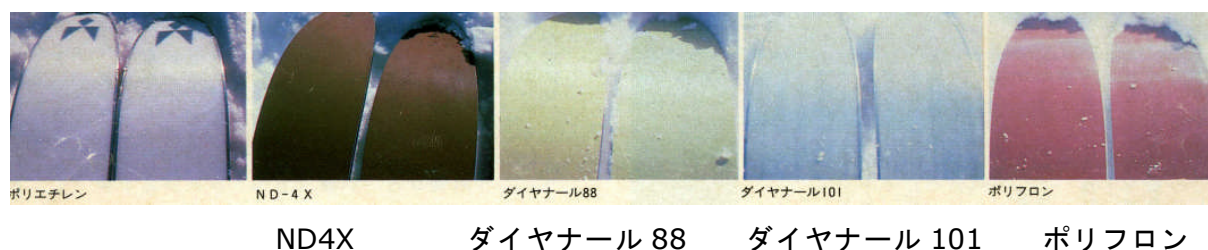


図 38 スキーの滑走面

表 7 テストスキーの摩擦係数 (空気抵抗を含む)

速度 m/s	ND4X		ポリフロン		ダイヤナール 88		ダイヤナール 101		ポリエチレン:標準	
	アイス バーン	新雪	アイス バーン	新雪	アイス バーン	新雪	アイス バーン	新雪	アイス バーン	新雪
2	0.03	0.07	0.03	0.05	0.03	0.07	0.04	0.10	0.03	0.05
5	0.02	0.13	0.04	0.09	0.06	0.14	0.04	0.19	0.03	0.09
10		0.3		0.3						0.3
15	0.17		0.16						0.15	

ND4X およびポリフロン塗装面が通常のポリエチレン滑走面スキーと同程度の小さい値を示した。アイスバーンと新雪を比較すると新雪の摩擦が大きい。新雪ではスキー底面と雪面の密着性が良くなるため、真の接触面積が増大し、摩擦を大きくする。秒速 10m/s, 15m/s ではスキーヤーの受ける空気抵抗が増すために、表では大きな摩擦係数となっている。

(人が乗ったスキー滑走では速度の 2 乗に比例する空気抵抗が作用するため、長い間高速でのスキー滑走面と雪面間の摩擦の測定は難しいと考えられていた。しかし、藤岡らが初期に試みたスキーを前へ押しすすめるための力の測定法が後に Ingenschnou らにより高速下でのスケート滑走における摩擦測定に発展させられたことに着目すれば、人が乗ったスキー滑走においても、人体の空気抵抗があっても、スキーの雪面に沿う方向に働く力と雪面を垂直に押す力だけを同時計測する道が開かれていると思われる。)

### (3) 理論スキー滑走面の備えるべき条件

スキーは直滑降，回転のほか雪面の凹凸などの影響を受け，複雑な運動をするから，よいスキーはさまざまな優れた特性を備える必要がある。ここでは，そのうち雪面と滑走面間の摩擦を小さくするという観点に絞って，良く滑るスキーの条件を述べよう。

摩擦を小さくするには真の接触面を小さくすることが第一条件であり，次に真の接触面の付着強さを小さくすることが第二条件となる。雪粒（氷）は硬く，剪断強さが小さいことから掘り起こし抵抗が大きい。この掘り起こし抵抗を小さくするためには「平滑な面」

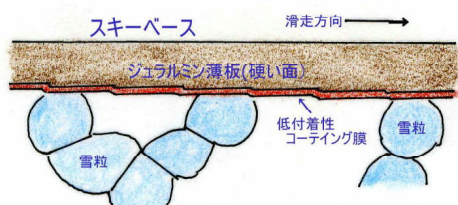


図 39 摩擦抵抗を小さくする理論スキーの滑走面

がよい。この三つの条件を満たすスキー滑走面が備えるべき条件は次のようになる。

- ①第一，第三条件から硬い平滑な滑走面。これにはジュラルミンのような柔軟性があり軽く硬い表面がよい。
- ②第二条件から氷に対して低付着性の表面。テフロンや低付着性のコーティング膜が良い。
  - ①に挙げた硬い平滑面は真の接触面を増大させるから，滑りをよくするという目的としては逆効果な面も備えている。この点を克服するために次の③の条件を満たす必要がある。
- ③真の接触面を小さくするような表面に窪み模様を備えた面。このとき，窪みの角が掘り起こし抵抗の新たな発生源とならないよう工夫する必要がある。

## 5.2 スキーの力学

図 40 のような角度  $\theta$  の一様な斜面を一直線に滑降するスキーヤーの運動を考えよう。この場合，重力による斜面方向への駆動力が  $mg \sin \theta$ ，スキーと雪面間の摩擦抵抗が  $\mu_k mg \cos \theta$ ，スキーとライダーの受ける空気抵抗が  $(1/2) \rho C_D AV^2$ ，および揚力が  $L$  である。

$$m(dV/dt) = mg \sin \theta - \mu_k (mg \cos \theta - L) - (1/2) \rho C_D AV^2 \quad (21)$$

ただし， $m$ ：スキーとライダーの総質量， $V$ ：速度， $t$ ：時間， $\mu_k$ ：運動摩擦係数， $\rho$ ：空気の密度， $A$ ：空気抵抗を受ける投影面積， $C_D$ ：空気抵抗の形状因子である。

$$D' = (1/2) \rho C_D AV^2 \quad (22)$$

とすると， $D'$ は空気抵抗力となる。

さて，図 37 のような水平面上の滑走テストでは  $\theta = 0$  となり，斜面上の駆動力  $mg \sin \theta$  はワイヤーの牽引力  $F$  に置き換えられる。

$$F = \mu mg + (1/2) \rho C_D AV^2 \quad (23)$$

$C_D$  は単純な物体の場合には理論的にその値を求めることが出来るが，人体の姿勢のように複雑な形状のものに対しては理論的に決定することが極めて難しい。渡部・大築は，図 41 に示す直径 3m の風洞を用いて測定した空気抵抗力  $D'$  および風速  $V$  の値から  $C_D A$  (単位  $m^2$ ) を計算した(図 42)。  $C_D A$  を抵抗面積という。

スキー単独の場合の空気抵抗  $D'$  は風速 10m/s のとき 1.4N，15m/s のとき 3.2N，20m/s

のとき 5.4N, 30m/s のときで 12.5 ~ 12.8N であった。

図 42 の各写真の 3 桁の数字の最初の桁 1, 2, 3 はそれぞれ 10m/s, 20m/s, 30m/s の風速を意味する。

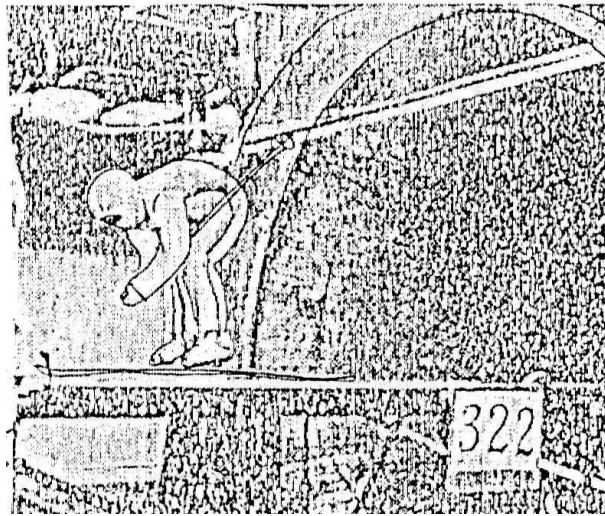
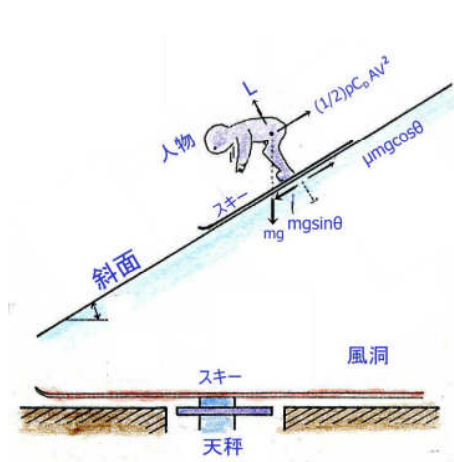
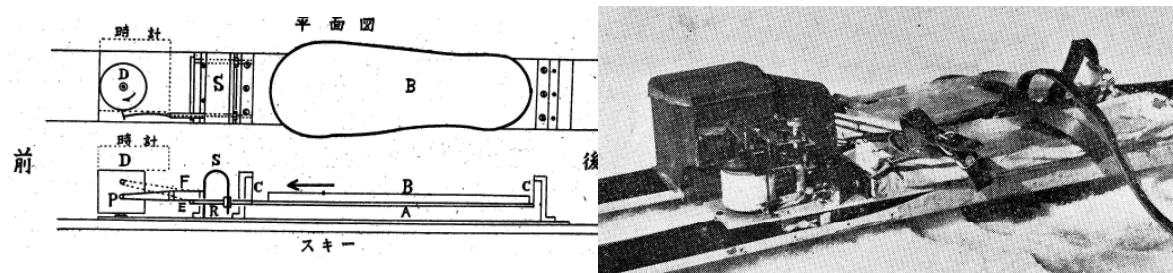


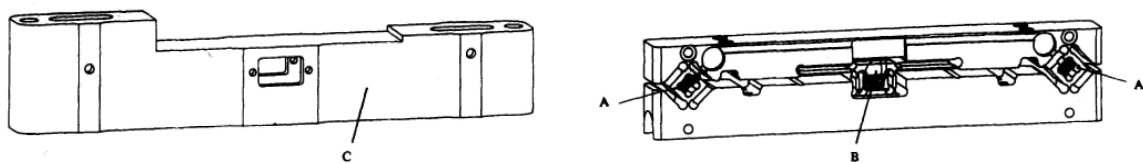
図 40 スキーに働く力 図 41 風洞を使った D' の決定 (渡辺・大築, 1972)

空気抵抗は速度 30m/s のとき図 42 の No.12~No.21 に示されるように 120N~260N まで姿勢によって 2 倍以上に変わる。雪面とスキー底面の摩擦抵抗はスキーヤーの体重を 600N、摩擦係数を 0.05 とすると 30N にすぎない。30m/s の高速滑走では摩擦抵抗の 4~9 倍の大きな空気抵抗を受ける。したがって、競技のタイムを支配する主要因はいかに空気抵抗を小さくするかスキーヤーの姿勢にあるといえる。一方、秒速 10m/s 以下の低速領域では空気抵抗と摩擦抵抗の大きさは逆転するから摩擦抵抗の軽減が重要となる。



スキーと雪面の摩擦抵抗測定装置 (藤岡, 1954)

(人体による空気抵抗摩擦測定の影響となる。藤岡敏夫は 1950 年という早い時期にの影響を受けない純粹の底面摩擦測定法を開発していた。この測定法を斜面滑走用に改良すればより実用的となる。)



スケートの摩擦測定器 (氷面を押し垂直力と摩擦抵抗力が計測される)

(Koning, Groot, Ingen Schenau, 1992)

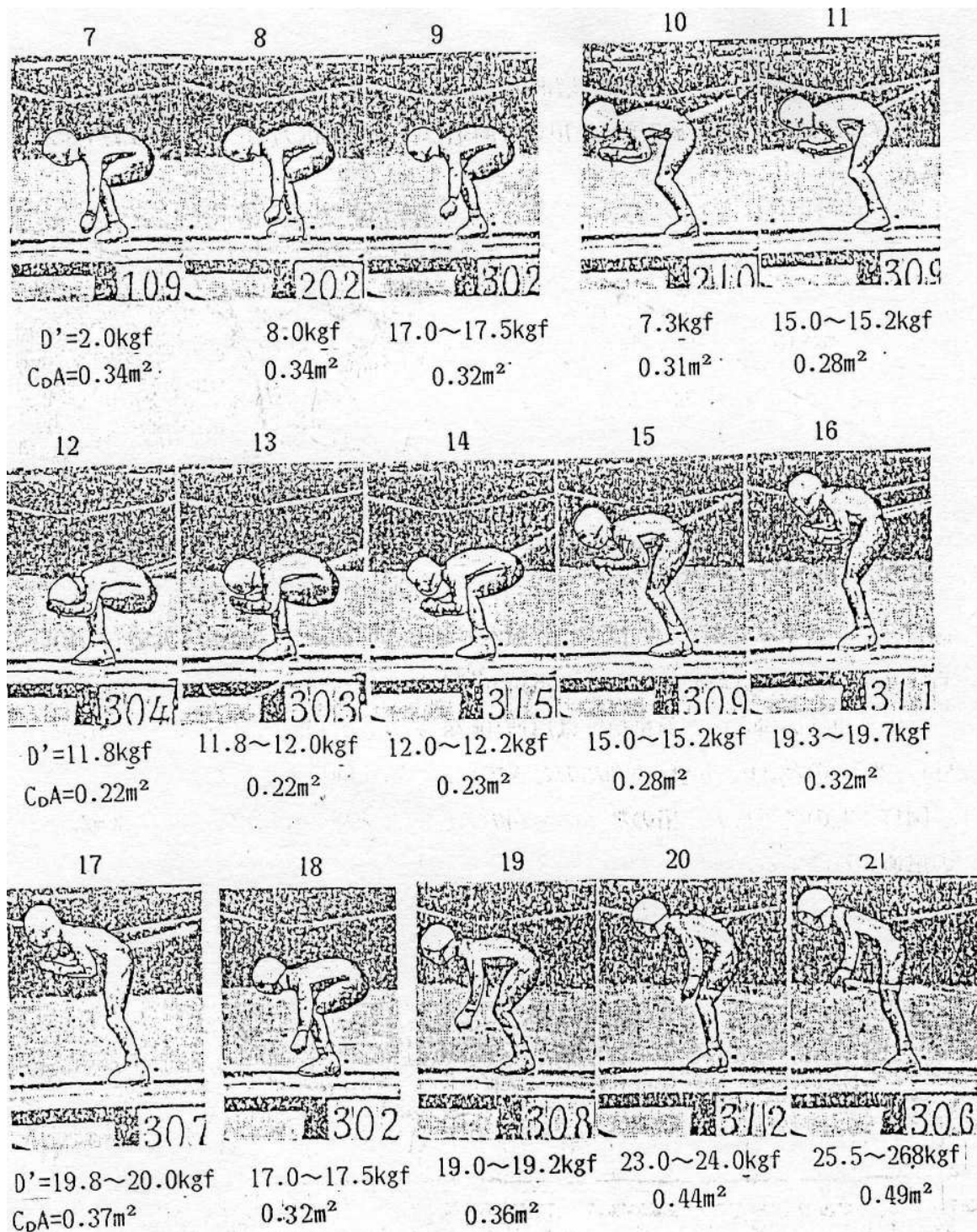
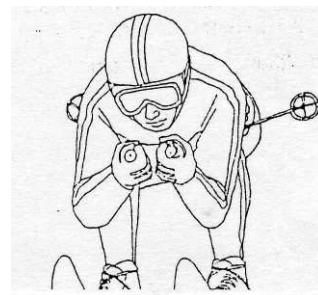


図 42 スキーライダーの姿勢と空気抵抗  $D'$  ならびに抵抗面積  $C_oA$ (渡部・大築, 1972)  
右図は卵型姿勢の正面図



## 6. スキーワックス

通常のスキー滑走面材であるポリエチレン $[-CH_2\cdot CH_2-]_n$ はその表面に最適ワックスが塗られた時に、雪面上のスキーの滑りは向上することが経験的に知られている。ワックスを塗るには先ずコテで加熱しながらワックスをスキー滑走面にしみ込ませるようにしながら一様な厚さに広げる。次いで布などで表面を研磨し、最後に余分なワックスをスクレーパを用いて表面から除去する。この時、滑走面にはできるだけ薄いワックスの層だけが残るようにする。世界的なワックスメーカーであるトコの説明書によると、ワックスの効果が次のように説明されている。

雪面状態は雪温、雪質（粒度、雪粒の形、硬さ等）、水分の有無によって著しく変わったものとなる。この雪面状態に最も適合するワックスと塗り方を選ぶのが、競技において最高の滑りを実現するために極めて重要となる。

ワックスが柔らかすぎると、雪粒の突起がワックスを引っ掻くことに大きなエネルギーが失われる。逆に、ワックスが硬すぎると、ワックスは雪粒によって傷つき易くなり、表面が平らに維持されない。そのため雪面との咬み合い抵抗が増して、摩擦が大きくなる。一方、ワックスがスキーベースへ十分に粘着していない場合には、ワックスが部分的に剥がれ、表面が平らに維持されなくなって、摩擦が増す。硬さと粘着がよく、ワックスの表面が平らに維持されるときに理想的な滑走が得られる。トコの説明にはこのほかに、滑走面での水滴の形成とその作用についても触れているが、水滴とワックスの相互作用については次節に述べるような疑問があるのでここでは省く。

滑降のスキーレーサーは回転や大回転のレーサーよりも柔らかいワックスをよく使用されるとされる。これは回転・大回転ではターンの際に非常に大きな圧力でワックスが雪面に押し付けられるため、その圧力に耐えられるように硬いワックスが選ばれるのであろう。

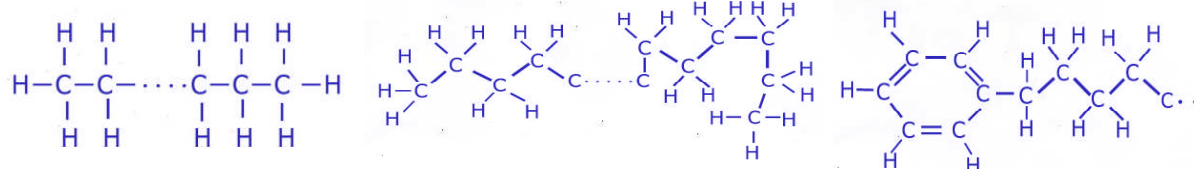
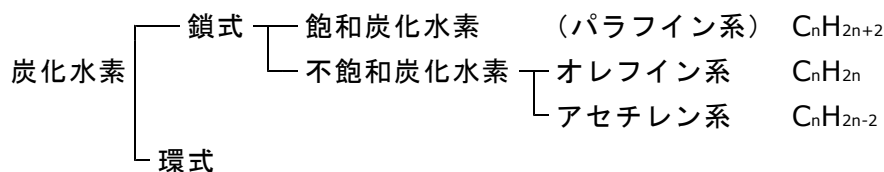
ワックスの語源はアングロサクソン語の蜜蜂の分泌物（密蝋）のことである。

ワックスには動物系と石油系がある。

動物系 蝋—脂肪酸と高級アルコールの化合物

石油系 パラフィンワックス、マイクロクリスタリンワックス等

パラフィンワックスは炭素と水素だけからなる化合物（炭化水素）である。



直鎖式飽和

2メチルアイコサン

図 43 各種ワックスの構造（日本精蝋より）

ワックスは図 44 に見られるように単一分子の集合体ではなく、炭素数 20 ~ 35 の広い



範囲の分子の集合体である。この様な性質のためワックスの融点是一定値を持たず、温度を上げてゆくと、炭素数の少ないものから融解を開始し、徐々に軟化し、ある温度で融解が完了する。

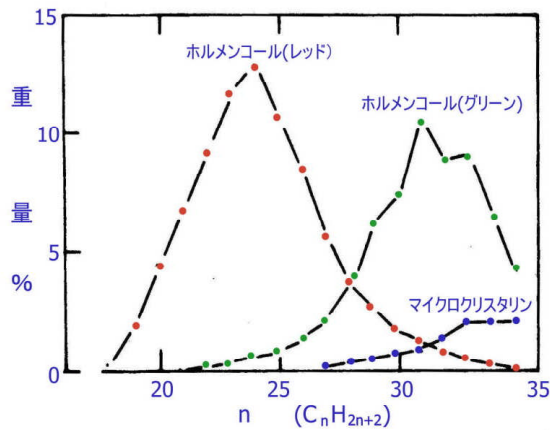


図 43 ワックスの炭素数分布

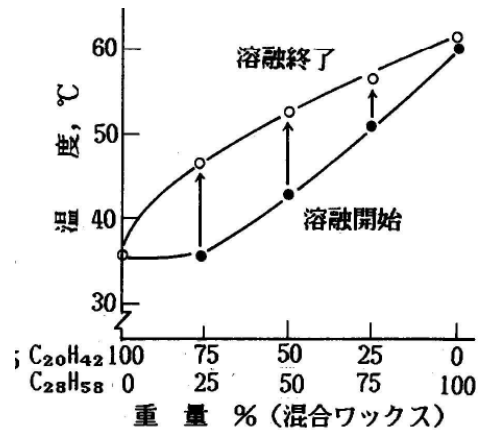


図 44 ワックスの融点 ( 棚橋, 私信)

表 8 市販ワックスの特性 (接触角, 硬さ, せん断強さ, 摩擦係数)

ワックスの種類	接触角 度	硬 さ, MPa			せん断強さ, MPa			$\mu_k$ 氷-ワックス
		-5	-10	-30	-5	-20	氷-ワックス	
トコシステム赤	100	9.5	10.5	34.0	2.0	2.6	0.20	0.043
ハイレット	104	10.0	13.0	65.0	2.9	3.2	0.17	0.029
緑	101	11.0	12.5	40.0	2.9	3.0	0.20	0.041
黄	103	7.0	8.0	83.0	1.8	2.5	0.50	0.061
ベース	102	7.5	10.7	30.0	2.0	2.6	0.09	0.052
トコ No.1 赤	100	8.0	9.0	10.5	3.0	3.5	0.61	0.045
No.3 シルバ	106	10.3	13.5	37.0	4.1	3.7	0.17	0.053
No.5 黄	103	11.0	10.5	28.0	1.7	2.3	0.48	0.039
トコ FT90	105	11.0	11.0	33.0	2.7	-	0.39	0.039
ホルメンコール 白	99	11.0	11.0	85.0	1.7	2.4	0.90	0.046
オレンジ	101	11.0	13.0	70.0	1.7	2.5	0.64	0.038
緑	97	19.0	23.0	50.0	3.2	3.6	0.45	0.030
赤	103	11.0	11.0	80.0	3.0	3.0	0.48	0.043
青	95	17.0	19.5	150.0	2.3	2.7	0.21	0.038
黄	98	11.5	11.5	70.0	1.6	2.2	0.28	0.043

1MPa=10kgf/cm<sup>2</sup>

表 8 にはワックスの接触角, 硬さ, せん断強さ, 氷に対する摩擦の諸特性を示した。接触角は図 45 に示すように平滑なワックスの水平面または鉛直面に小水滴をのせる方法

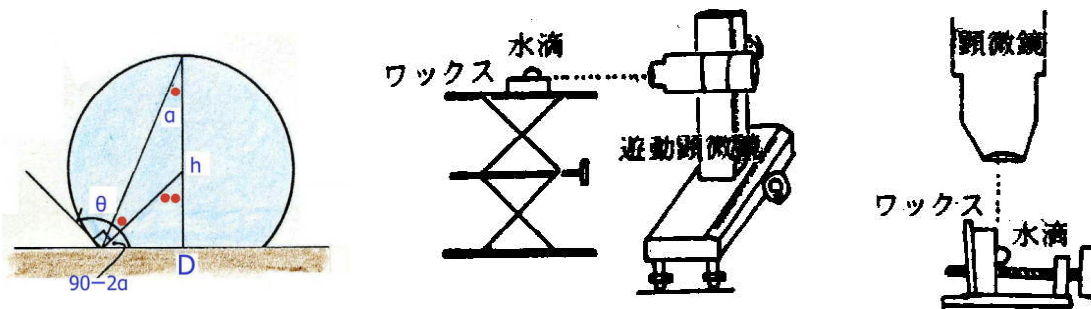


図 45 接触角の測定

$$\tan \alpha = (D/2)/H \quad \theta = 180 - 2\alpha = 180 - 2 \tan^{-1}(D/2H)$$

で測定した。

読み取り顕微鏡（遊動顕微鏡）で水滴底面の長さ  $D$  と水滴の高さ  $H$  を測定すると、接触角  $\theta$  は次式から求まる。

$$\theta = 180^\circ - 2 \tan^{-1} D/2H \quad (23)$$

スキーワックスについての測定値は  $95 \sim 105^\circ$  であり、多くが  $103^\circ$  内外にあった。硬さはワックス面に鋼球を滑らせて、ワックス面に形成された溝の幅とその時の荷重から決定した。 $-5^\circ\text{C}$  で  $1.7 \sim 3\text{MPa}$ 、 $-20^\circ\text{C}$  で  $2.2 \sim 3.7\text{MPa}$  で、氷の硬さに比べると一桁小さい。最後の動摩擦係数は先端が丸みを持った円錐状氷を毎秒  $0.4\text{mm}$  ( $-5^\circ\text{C}$ ,  $2.9\text{N}$ ) で滑らせた時の値である。この雪粒とワックス間の界面せん断強さは  $(0.1 \sim 0.6)\text{MPa}$  であった。氷-ワックス間のせん断強さは  $-5^\circ\text{C}$ 、速度  $0.4\text{mm/s}$ 、荷重  $2.9\text{N}$  の実験から求めた。

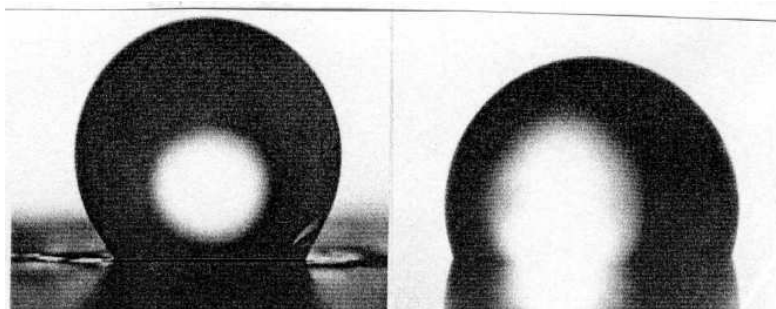
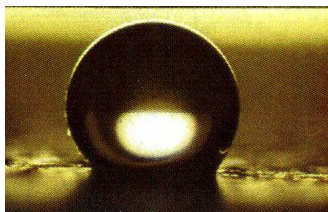


図 46 ワックス上の水滴

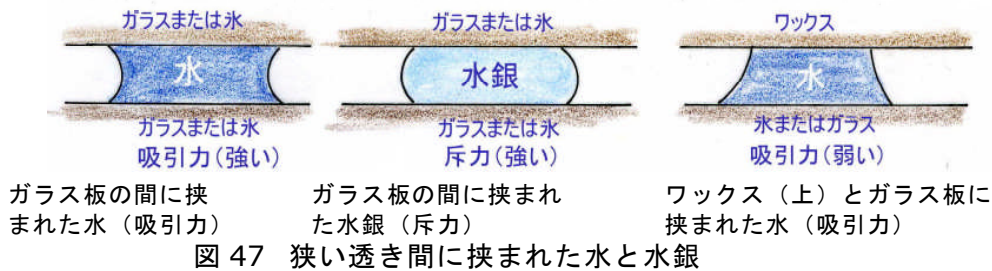
## 6.1 ワックスの効果

ワックスを塗ったスキーはよく滑る。ワックスが何らかの機構で潤滑作用をしているわけであるが、どういう機構によるのかについては未だ不明の点が多い。

ここでは、二つの考えを述べる。一つの考えはワックスの水に対する接触角 ( $90 \sim 110^\circ$ ) の大きいことが、水をはじき、摩擦を小さくするという伝統的なものである。パウデン (Bowden)、新保、棚橋など多くの研究者により採用されている。もう一つは対馬の考えで、ワックスが氷との付着強さを減少させるというものである。

ワックスの接触角はスキー底面のポリエチレンより大きいので、ワックスを塗ることで水をはじく能力が強くなると考えられがちである。この立場から接触角と摩擦係数との関係を調べ、接触角の大きいほど摩擦が小さいという結果も報告されている。しかし、注意しなけ

ればならないことは、この報告と摩擦界面の水の存在が必ずしも等号で結ばれるとは限らない点である。水が関与しなくても、接触角の大きい面は一般に氷に対する付着も小さい。それゆえ、スキーの摩擦が小さいことの説明には、界面に水の存在を必要とするとは限らない。



傾斜して置かれたワックス面に水滴を落とせば、水滴は丸くなり滑り落ち、ワックス面が濡れることはない。そんなことからワックスは水を弾くと考えられがちだ。しかし、スキー滑走におけるワックスと水との関係は単純ではない。

スキーの滑りを説明する場合、「ワックスが水をはじく」ということは、滑走中に水をはじくのため「ワックスと雪粒との真の接触面に形成された水をはじく」という意味でなければならない。しかし、この意味での水をはじくという主張はスキーの滑りに適用できない。なぜなら、ワックスは薄い水膜を介して氷を吸い付けてしまうのである。たとえば、薄い水膜を挟んだ 2 枚のガラス板の間では隙間が狭くなるほど吸引力が強くなるのに似ている。ワックスが水をはじくためには、ガラス板の間に挟まれた水銀と同じような現象が起こらなければならない。つまり、板を押し付けると水銀は広がり透き間は狭くなるが、力を除くと水銀は再び縮まり、板は元に戻される。この場合、水銀は 2 枚のガラス板に斥力を及ぼしている。しかし、ワックスと氷の間に水膜を挟んだ場合、水はワックスと氷を引き寄せてしまうのである。隙間に挟まれた水(図 48)はガラス板の場合と同様に内側に凸の形をし、「負圧」となって吸引力を及ぼしているのが解る。ワックスのもつ  $110^\circ$  程度の接触角では、ワックスと氷(接触角  $0^\circ$ )の間に挟まれた水をはじく能力はない。水をはじくためには接触角が  $140^\circ$  の超疎水性材であるペロックス 140 ないしトラノックス(Tullanox 500 または Tullanox300)などを用いる必要がある。

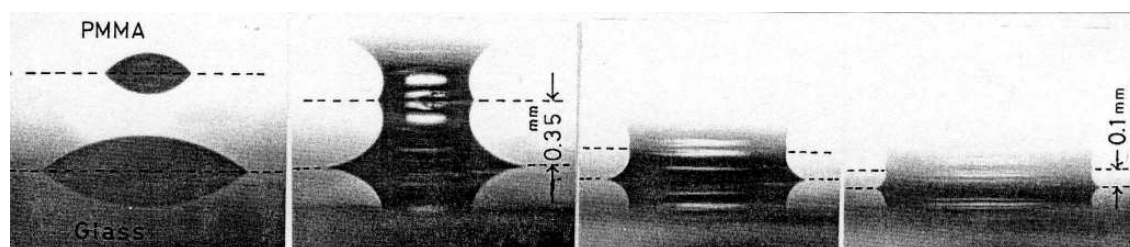


図 48 狭い隙間の水(隙間の間隔により接触角が変化する)

そのほか、ワックスについての研究成果を挙げると、

- 1) 滑走中にワックスがスキーの滑走面上を若干流動する
- 2) 塗布するワックスの層が厚いとかえって摩擦が増す。

- 3) ワックスはできるだけ薄く、しかも平滑に塗った方が効果がある。そのためスクレーパーで余分なワックスを除去する。滑降競技では平滑に塗られたワックスに故意に傷を付けることが行われる。
- 4) ワックスは滑走過程で摩耗する。雪温の低いときは硬いワックスが効果的である。
- 5) 湿雪の時は、ワックスを波型に塗るほうが潤滑効果を高める。
- 6) ワックスはゴミを吸い付ける。ワックスもポリエチレンも絶縁体、誘電体なので摩擦帯電を生ずる。その結果、静電的吸引力でゴミを吸い付ける。帯電防止のため炭素繊維を混入し、伝導性をもたせたポリエチレンや伝導性ワックスも使われる。等が知られている。

-5℃でのワックスの硬さは、5～20MPa、せん断強さは1～3MPaである。これらの値を氷の硬さ、せん断強さと比べると、ワックスの硬さは氷の1/10～1/4と柔らかく、せん断強さの方はほぼ同じであることがわかる。なおワックスの表面上に雪粒を滑らせたときには、雪粒先端はワックスの表面層に食い込み、ワックスに傷を付ける。この時の抵抗には純粹の摩擦抵抗（平滑面の摩擦抵抗）の他に、溝を掘るための抵抗が加わる。そのため純粹の界面せん断抵抗を決定するのは困難であるが、見掛けの値（溝掘り抵抗を含んだ値）を求めると-5℃で0.5～1.0MPaとなり、ワックス自体のせん断強さの1/4～1/2となった。

ワックスとポリエチレンは類似の分子式を持っているが、ポリエチレンは炭素鎖が数万～数百万と多いのに比べ、ワックスでは数十と小さい。ポリエチレンとワックスは分子結合をしないことが、ワックスの摩耗を早めているといえる。ポリエチレン同士は加熱によって軟化し、溶着できる。類似の溶着をワックスとポリエチレンベースの間に実現できれば、ワックスの持久性を高めることにつながるであろう。

## 6.2 凝着説によるワックス効果の説明

1. ワックス面の摩擦の凝着説による説明。ワックスの氷に対する付着力 $S$ はワックスにより異なるが、表8からわかるように0.1～0.9MPaである。一方、ワックスの硬さ $p$ は表8から-5℃で10MPa程度である。凝着説から摩擦係数 $\mu$  ( $=s/p$ )は0.01～0.09となり、実測の0.04程度の摩擦係数が（溶け水を介在させなくても）説明される。
2. スキーに塗るワックスの層を薄くする理由、凝着説による説明。ワックスの層を薄くすることは、凝着説に立つと「真の接触面積と掘り起こし抵抗を小さくする」操作であると解釈される。ワックスの層が厚ければ、雪粒の先端がワックスに食い込み、掘り起こし抵抗を大きくするとともに、真の接触面積も増えて、剪断抵抗も増大し、その分スキーの滑りにブレーキとなる。荷重は主にスキーベースのポリエチレンが支え、滑りをワックスに分担させている。
3. 接触角の大きい面が好ましことの凝着説による説明。接触角の大きい面ほど水に対する結合が弱い。同様に、接触角の大きいワックスは氷に対する付着力が小さい。この点で接触角の大きいワックスがより滑りを向上させるということは凝着説からも導かれる。つまり、接触角の大小と滑りの善し悪しの関係は溶け水介在の絶対的な証拠にはならないのである。
4. 摩擦係数の速度効果は凝着説に有利。水が介在しているとすれば、摩擦抵抗は各雪粒先端に形成される水膜の粘性抵抗となる。そのとき、抵抗は速度に比例して大きくなるであろう。しかし、実際のスキーでは速度が速くなると、底面の摩擦抵抗が減少する（人体の受け

る空気抵抗は速度の 2 乗で増大するが、これは底面の摩擦抵抗と無関係) のだから、「水潤滑—水をはじく」では説明できない。雪粒は粘弾性体であり、高速ほど真の接触面積が減少するから、凝着説の立場でも摩擦抵抗は減少するのであり、滑りの向上することが説明される。

5. 接触角の大小と滑りの問題は慎重に扱うべきである。仮に「接触角が小さくて氷に対する付着力も小さい物質」あるいは「接触角が大きくて氷に対する付着力も大きい物質」が見出され、それによる摩擦試験が行われるようになれば、ワックスの効果により明確に判定されるものと期待される。しかし、まだそのような都合のいい材料が見出されていない。

6. 第 18 章「摩擦融解説の内部矛盾」は「ワックスが水を弾くという学説の内部矛盾」としても適用できる。ワックスが水を弾くとすれば、先ず、摩擦面に接する雪粒が溶けて水が発生しなければならない。この水が発生させるためには氷を溶かすための熱エネルギーが必要である。熱つまりは摩擦熱が必要なわけで、摩擦が大きいときほど、発生する熱も多く、多くの水が発生する。その水をワックスで弾くことによってスキーの滑りが向上するという説明が多く行われている。温度が下がったり、速度が遅くなると、発生する水が少なくなれば、滑りが悪くなると主張する。滑りを良くするために、溶け水を多くしようとすれば摩擦熱を多く発生させなければならない。つまり、水潤滑説では滑りを良くするために、摩擦を大きくしなければならない。これは「水潤滑—ワックス効果」の自己矛盾である。

(水が発生しない低速でもワックス上の氷球面の摩擦は小さい(表 8)。仮に水が介在するとすれば、水膜はどのような抵抗を示すのだろうか。従来の説明は水膜内の粘性抵抗が摩擦抵抗になるという説明ではなく、水膜がワックス面上を滑るため水膜内の速度勾配が小さくなり、したがって摩擦抵抗が小さくなると考えていたようである。これを定量的に説明しようとすると水膜厚さは数 nm になってしまうのであろう。)

#### 補足 ワックスと雪粒の摩擦、ワックスの硬さの測定法

図 50 の写真(左)は左方向へ移動するワックス(赤色)平面と球面状の先端をもつ氷(先端が真鍮のホルダーに凍着されている)との間の摩擦の測定を示している。真鍮ホルダー部分が荷重変換器(U ゲージ, 容量 5N)のセンサー部を押している。氷試料ホルダーは水平な棒にネジ留めされている。この棒の手前はユニバーサルジョイント(万能軸受)に連結されている。

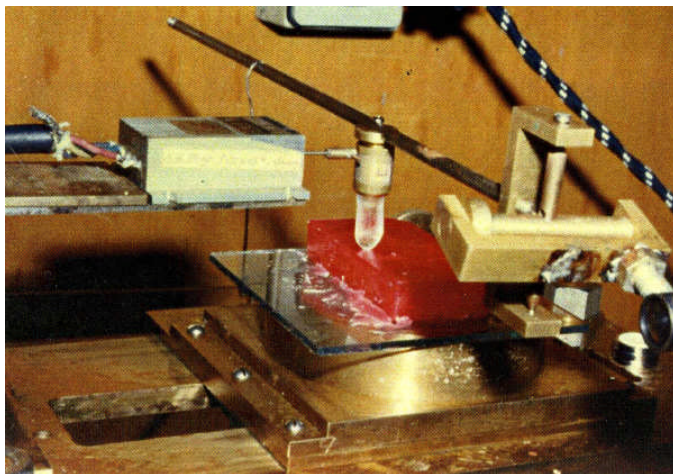


図 49 氷面(雪粒先端)とワックスの摩擦

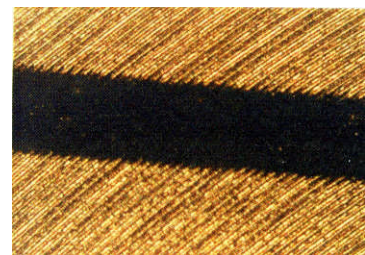


図 50 ワックス面の摩擦痕

図 50 (右) はスキーワックスの上に刻まれた摩擦痕を示す。この場合、摩擦痕を識別しやすいように、旋盤でワックス表面を削る際に螺旋状の傷がワックス面に刻まれるように仕上げられている。ワックス上を滑走体が通過した摩擦痕が幅の広い黒線となって明瞭に示されている。

## 7. スケート

小林ら(1970)は競技用スケートに 16 ミリムービーカメラを積んで、カタパルト装置から氷のリンクに発射させた。氷の内部に 1m おきに入った測線が撮影された。秒速 1.4m で打ち出されたスケートの滑走停止距離は氷温やスケートリンクによって異なったが 10 ~ 36m であった。最も滑りの悪かったのは氷温-8 °Cで表面に霜の降りた状態であった。また最長滑走距離は-0.5 °Cで得られた。

図 51 にはスケートの発射装置 (右) と 16mm ムービーカメラを積んだスケート (左) が示されている。撮影駒数は毎秒 30 駒なので、最大で一駒の間にスケートは 50mm 進む。スケートの全装備重量は 530N であった。この測定ではスケートを直線的に進ませるため、ブレードの平行性が保たれるよう注意すること、偏荷重にならないように注意する必要があった。

滑走停止距離が温度の関数として図 52 に示されている。温度が高過ぎても、また低過ぎても、滑走距離は短くなった。滑走中の速度の変化を示す図 53 を見ると、速度は滑走時間に対し直線的に減少している。

式で表すと、

$$Mdv/dt = -\mu_k Mg \quad (24)$$

$$\text{積分して } v = v_0 - \mu_k gt \quad (25)$$

M はスケートの質量、v は速度、 $\mu_k$  は動摩擦係数、g は重力加速度である。

$dv/dt = \text{Const.}$ であったことから、 $\mu_k$  は速度に関係なく一定であることが解る。

摩擦係数を求めると表 9 のごとくであった。 $\mu_k$  は 0.003 ~ 0.01 と極めて小さな値であるのがわかる。

流体摩擦の抵抗は速度勾配に比例するはずだから、図 53 の結果が速度に無関係で固体摩擦の性質を示したことは注目すべきである。

このスケートの滑りが流体潤滑なのかどうかを検討しよう。流体摩擦に対する抵抗は

$$F = \eta (V/d) S \quad (26)$$

で与えられる。

表 9 スケートと氷の間の動摩擦係数  $\mu_k$  (小林ら,1970), 初速 1.5m/s

場所 温度	-0.5 °C	-2 °C	-5 °C	-10 °C
たての海	0.0031	0.0042	0.0066	0.0102
瑞浪リンク	0.0078	0.0042	0.0066	0.0102

$\eta$  は 0 °Cでの水の粘性係数  $1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $=1.8 \times 10^{-3}(\text{kg/m})\text{s}$ ),  $V=1\text{m/s}$ ,  $d=1.0\mu\text{m}(=10^{-6}\text{m})$ ,  $F=2.5\text{N}$ (体重 500N,  $\mu_k=0.005$  と仮定して、接触面積を S を求めると

$$2.5\text{N} = [(1.8 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}) (1\text{m/s})/10^{-6}\text{m}] \cdot S, \quad S=1.3 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

つまり、 $S = 13\text{cm}^2$  となり、これではスケートの見かけの底面積 ( $8\text{cm}^2$ ) を越えてしまう。仮に接触している底面積を  $4\text{cm}^2$  とすると、速度  $V=1\text{m/s}$  で上のスケートの滑りを説明するためには水膜の厚さを  $d=0.3\mu\text{m}$  とする必要がある。次に、 $V=0.1\text{m/s}$  の滑りを説明するためには水膜の厚さが  $d=0.03\mu\text{m}$ 、速度  $10\text{m/s}$  なら  $d=3\mu\text{m}$  ということになる。真の接触面の圧力は  $1.25\text{MPa}$  となり、氷のブリネル硬さに比べ桁小さい圧力となるのも問題である。スケートの滑った跡には明瞭なシュプールが残るから、仮定された圧力は小さすぎ、水膜厚さが速度に比例して水膜の厚さが変わるとする仮定も無理があるように思われる。また氷のリンクに明瞭なシュプールが認められることは水膜による抵抗の他にも摩擦に關与する抵抗が存在することを示している。

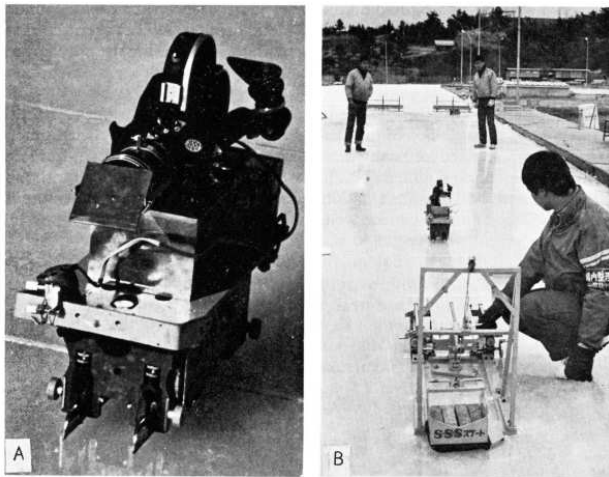


図 51 テストスケートとカタパルト  
(小林ら, 低温科学より転載)

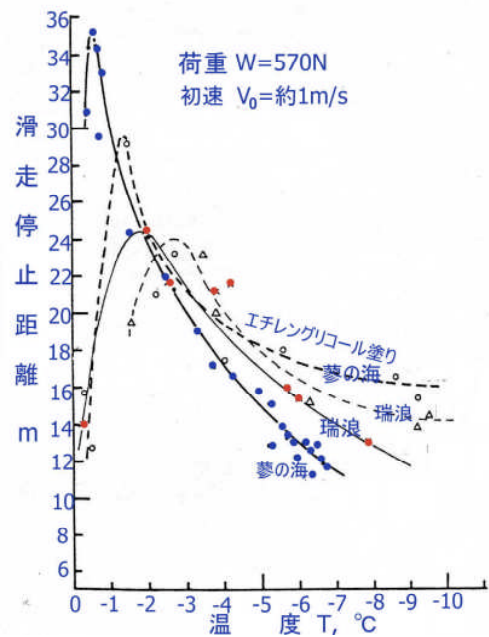


図 52 氷温と滑走距離との関係  
(小林ら, 低温科学より転載)

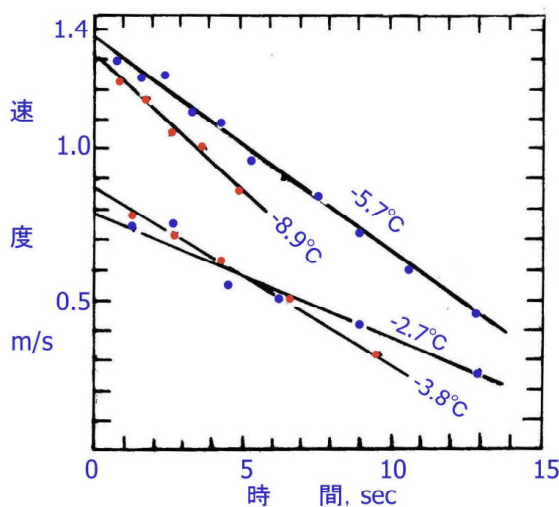


図 53 テストスケートの速度・時間曲線 (小林ら, 1970)

注. 小林らの測定は  $0.5\text{m/s}$  以下の低速度領域での摩擦係数の速度依存性はないと判断したが、その後、対馬らの測定はこの低速度領域で摩擦係数が増大することを明らかにしている。このような低速度域での摩擦係数の増大は Harrington (1924) の測定でも示されており、カーリングにおけるストーンのカールに関連して重要である。

同一面を繰り返し摩擦する場合には摩擦熱が蓄積されて流体摩擦の状態が実現されることはあるが、スキー・スケートのように次々に新しい氷の面上を滑る場合にも、流体摩擦が発生するとの主張に対しては疑問がある。通常、摩擦熱によって発熱が起こるのは真の接触面が引きちぎられる瞬間であり、水が発生したときには真の接触面が別の場所に移動し消失している可能性がある。

図 53 の右下がりの各直線はそれぞれ一定の摩擦抵抗を受けて速度が時間の経過とともに直線的に減少していることを示している。 $-2.9 \sim -8.9$  °Cの間で温度が低いほど直線の傾きが急になっていることは、温度が低いほど摩擦(係数)が大きいことを意味している。また、速度が時間に対し直線的に減少していることは、速度に無関係な一定の摩擦が働いていることを示している。

小林らは  $10^{-3}$  オーダーの低摩擦は水潤滑によるのだろうと推測したが、流体摩擦の抵抗  $F$  が水の粘性係数  $\eta$ 、速度  $V$ 、水膜厚さ  $d$ 、真の接触面積  $A$  を用いて

$$F = \eta (V/d) A$$

であらわされるとすると、 $(V/d)A = \text{一定} (=c)$   $d = c'AV$  ということになり、水膜厚さ  $d$  が速度  $V$  に比例するとする仮定には無理があるように思われる。

$$\eta = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Ps} \cdot \text{s}$$

$$V = 1.5 \sim 0.15 \text{ m/s}$$

$A = 1\text{mm} \times 150\text{mm} \times 2 = 300 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  (長さ 150mm が真の接触をしていると仮定、接触面の圧力は 1.7MPa と小さくなる。硬さとしてはブリネル硬さから推定すると一桁以上小さい)

$$F = 500\text{N} \times 0.005 = 2.5 \text{ N}$$

$$d = 1.8 \times 10^{-3} [(1.5 \sim 0.15) / 2.5] 3 \times 10^{-4} = (0.32 \sim 0.032) \times 10^{-6} \text{ m}$$

となる。

水膜厚さは速度 1.5m/s のとき  $0.32 \mu\text{m}$ 、スケートの速度が遅くなるほど水膜厚さは薄くなることになるが、滑走痕には視認できる明瞭な窪みが形成されるのだから、滑走痕は水膜だけでは説明できない。

真の接触面の剪断強さ  $s$  は

$$s = F/A = 2.5\text{N} / (300 \times 10^{-6} \text{ m}^2) = 8\text{kPa}$$

となる。この値は氷の剪断強さ 1MPa、付着強さ  $1 \sim 0.1\text{MPa}$  に比べても桁違いに小さく純粹の凝着で説明するのは難しい。

しかし、長さ 10mm が真の接触、真の接触面の圧力 25MPa(硬さとしては現実的な値)と仮定すれば、 $s = 0.13\text{MPa}$  となり凝着説で説明できるようになる。

この場合、真の接触面の大きさをどう取るかによって摩擦機構が異なる結果となる。

### (1) スケートの低速度摩擦

木製の平らで丈夫な台の上に長さ 1m 程度の氷の板を張り付ける。木製の板の下側には鉄のアンクルを張り付け補強するのもよい。スケートは図 54, 57 のように一本だけ使用する。スケートはフレームに固定されていて、フレームの底には載荷板がついている。このようにすると、重心が摩擦面より低くなり、一本刃のスケートでも安定に滑ることができる。スケートの先端からはステンレスワイヤーを伸ばし、端を一定速度で動く台車に取り付ける。台車はモータ(同期モータ)と歯車の組み合わせを色々に変えることにより  $10^5$  倍程度に



速度を変えるのは容易である。ワイヤーに加わる力をロードセル（荷重変換器）で検出し、ストレインメータ（歪み増幅器）で増幅したのち記録計に記録させる。

氷の表面を平滑に仕上げるには、金属製の平滑な大きな板を用いるとよい。予じめ 20℃程度に暖めておいた板を氷の上に載せると、氷の凸部から溶けて平滑になってゆく。金属板を氷の上に万遍なく滑らせる。金属板を取り去ったあと、氷の表面には水滴が所々に残るので、十分凍結するのを待ってカンナで削って仕上げる。

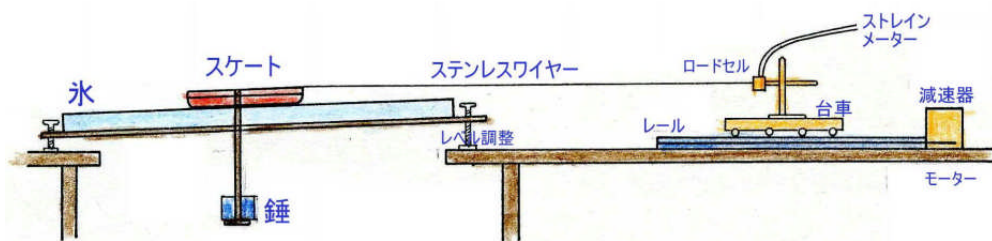


図 54 スケートの低速度摩擦

摩擦抵抗の測定に当たっては表面をわずかに（角度  $\theta$ ）傾け、登り勾配を滑るようにする。これは、ステンレスワイヤーにはわずかに弾力性があるためスケートがステック・スリップという不連続運動を生ずるのを防ぐためである。

（付着 (stick) 中にスケートは氷の表面にめり込み摩擦を増す。牽引力が増して急に滑る (slip) と、スケートは動き出した反動で余分に進み、ワイヤーにたるみが生ずる。このような間欠運動では摩擦抵抗を正しく測定しにくい。）

測定された抵抗力を  $F$ 、動摩擦係数を  $\mu_k$ 、質量を  $m$  とすると、

$$F = mg(\mu_k + \sin \theta) \quad \text{つまり} \quad \mu_k = (F/mg) - \sin \theta \quad (27)$$

図 55 および図 56 にはこのようにして測定された動摩擦係数  $\mu_k$  が温度および速度に対して示されている。

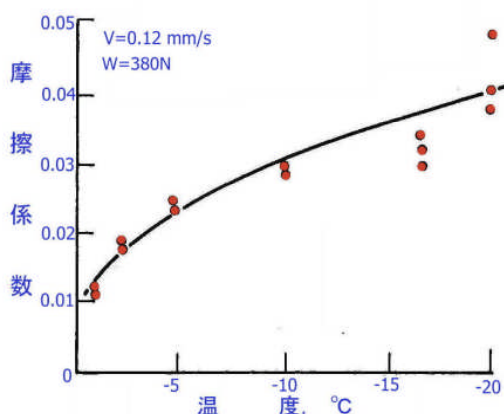
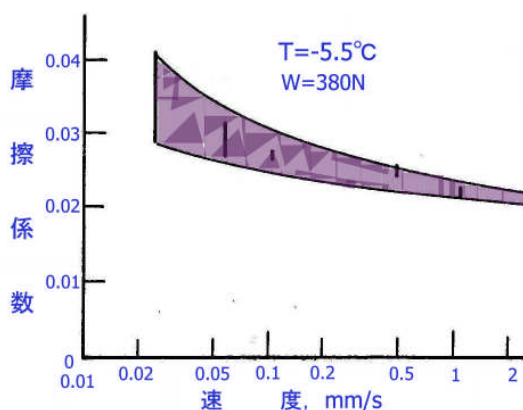


図 55 低速度摩擦における温度効果



$\mu_k$  は速度の増大とともに少しずつ減少し、2.5mm/s では 0.02 と、0.02mm/s のでの値の 4～3 割ほど小さい  $\mu_k$  となった。

図 55 には摩擦係数が温度の関数として与えられている。速度 0.12mm/s の時、 $\mu_k$  は温度の低下とともに徐々に増加し、 $-2^\circ\text{C}$ での 0.01 が  $-20^\circ\text{C}$ で 0.04 となっている。

速度 0.025mm/s の摩擦係数  $\mu_k$  は 0.03 ~ 0.04 ( $-5.5^\circ\text{C}$ ) であるが、この値を表 9 の  $-5^\circ\text{C}$  での  $\mu_k=0.007$  とくらべると 3 倍の違いが残っている。この違いが単に速度が  $5 \times 10^4$  倍違うことによるのか、あるいは局所的融解という現象などが関与しているのかどうかを解明してゆく必要がある。

### (2) スケートの静止摩擦係数

図 57 ではスケートを載せた長さ 1m の氷の板の左端にジャッキがある。はじめ氷の表面が水平になるように保っておき、一定時間後に左端を静かに持ち上げてゆく、 $h$  だけ持ち上がったところでスケートは滑り出す。氷を載せた板の支点間の距離を  $L$  とすると、静止摩擦係数  $\mu_s$  は、

$$\mu_s = h/L \tag{28}$$

で与えられる。

図 58 には接触時間を 30 秒から 40 時間の間で変えたときの静止摩擦係数が示されている。 $-5^\circ\text{C}$  の場合、30 秒から 10 分の間では  $\mu_s=0.04$  の程度であるが、接触時間が長くなるにつれ  $\mu_s$  は増大し、40 時間後に 0.13 に達した。氷の温度を  $-20^\circ\text{C}$  に下げたときには  $\mu_s$  は 0.1 ~ 0.14 の間に分散したが、 $-5^\circ\text{C}$  の場合のような接触時間による  $\mu_s$  の系統的な増大は認められなかった。

### (3) 氷筍リンク（氷結晶粒の向きを揃えたスケートリンク）

洞窟やトンネルの出入口にできる氷筍の中には直径 150mm、高さ 0.5m もの巨大な単結晶が見出されたことがヒントになって、人工的に大量の巨大単結晶氷筍を作り、それを薄くスライスした大きな単結晶氷をリンクに張り付ける。リンクに散水を繰り返して、厚い氷（室内リンクでは厚さ 30mm）のスケートリンク（図 59）が実現させた。

このリンクの上に小林らの用いた方法でテストスケートを滑らせたところ、表 10 の結果を得た。

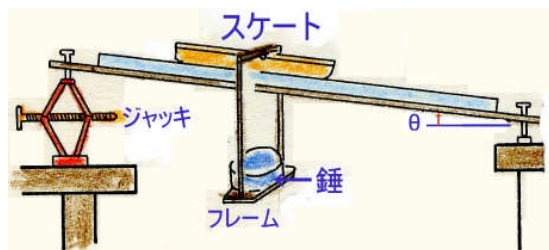


図 57 静止摩擦係数の測定装置

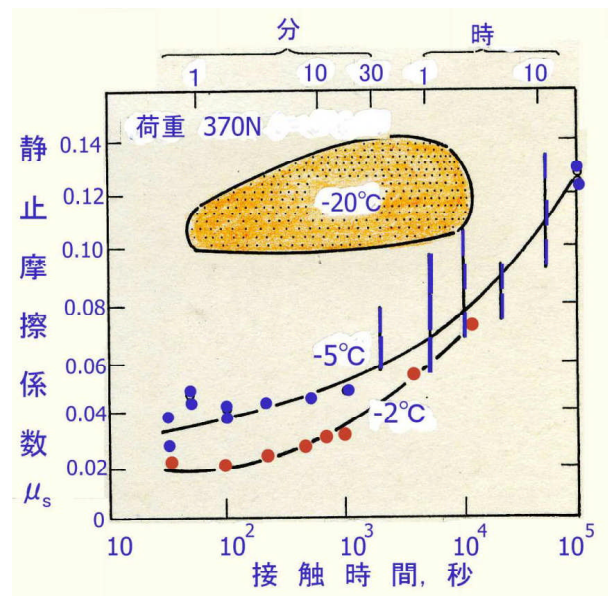


図 58 接触時間と静止摩擦係数

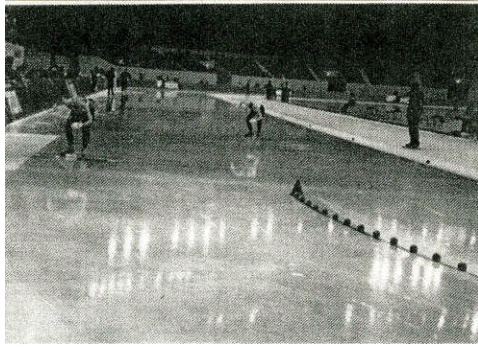


図 59 氷筍リンク

表 10 普通リンクと氷筍リンクでの摩擦係数の測定結果

速度 m/s	氷筍氷リンク 摩擦係数	普通氷リンク 摩擦係数	氷筍リンク：氷の結晶面(0001) 長野市Mウェーブ 競技用スケート使用 荷重 294N 小林と同じカタパルト式試験装置 初速度と滑走停止距離から動摩擦係 数を決定した。
0.9 ~ 1.1	0.004	0.0046	
	0.0037	0.0044	
	0.0036	0.0046	
1.1	0.037	0.0042	
	0.0040	0.0045	
平均	0.0038	0.0045	

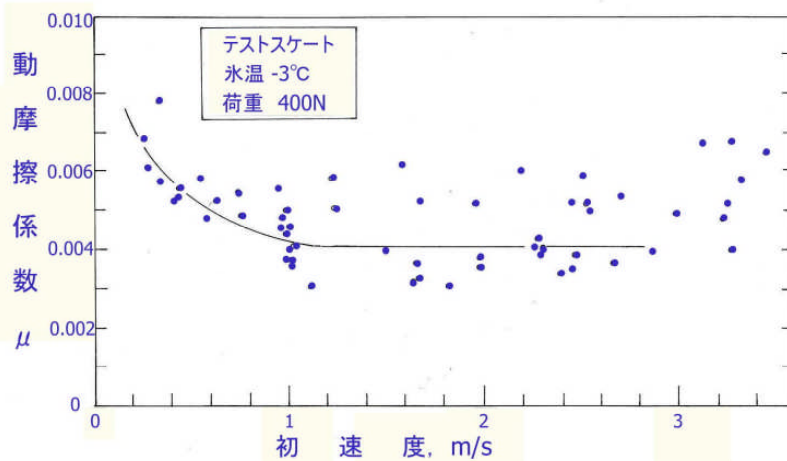


図 60 氷筍リンクで測定された動摩擦係数と速度の関係

補足 スケートの低速度摩擦

図 60 はスケートの低速度摩擦測定に用いた簡易型実験装置である。氷の上にスケートの刃が一本鉛直に立っている。写真ではスケートは 500N の荷重のついたフレームに固定されている。重心がスケートの刃の真下にあるため、一本のスケートでも安定して滑ることができる。

刃を鉛直軸から傾けてフレームに固定すれば、その角度を保って滑らせることもできる。スケート競技のコーナー部や逆ハの字型で直線部を滑走する際の進行方向への摩擦を測定するのに適している。氷は 20 °C ほどの真鍮板 (0.5m × 1m, 厚さ 5mm) をのせて、表面を均一に溶かしながら平滑に仕上げた。真鍮の温度が高いうちにはずすと、とけ水が部分的に盛り上がり、平滑にならない。十分冷えたところで、滑らせながら氷面から除去した。

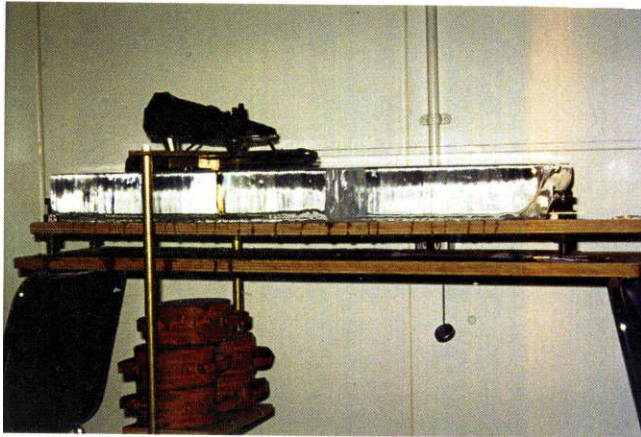


図 61 スケートの摩擦測定

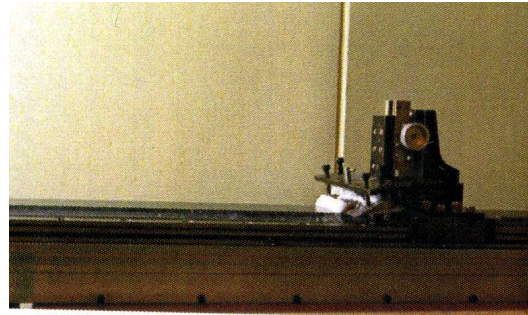


図 61 ミクロトームによる氷の表面仕上げ

図 61 は改良型で、長さ 1m の氷の表面をミクロトームの刃で削ることができる。この装置に氷試料を入れ、表面を平滑に削る。その後、ミクロトームの刃の部分を取り外し、代わりにフレームに固定されたスケートを取り付ける。この方法で再現性の高い摩擦実験が行われた。

滑った直後の氷の先端を顕微鏡で観察すると、球面の先端に平滑面が認められる。この平滑面の長径および短径を計測して、接触面積が算出される。

図 68 には半径 3.2mm の球面をオプティカルフラット（表面粗さ 0.2 $\mu\text{m}$ ）のガラス上に滑らせたものである。温度 -3.5  $^{\circ}\text{C}$  で荷重を 1 ~ 20N、接触時間をいろいろに変えることで塑性変形を進行させ、接触面積を 0.05 ~ 30 $\text{mm}^2$  に変えた。摩擦速度は  $7.5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$  であった。これらの測定では静止摩擦のピークは検出されず、静摩擦と動摩擦は等しかった。

図 68 の直線の傾きは 1 なので、摩擦力  $F$  は接触面積  $A$  に比例し、

$$F = A \cdot s \quad (29)$$

で表される。

図の場合、界面せん断強さ  $s$  は 0.5MPa (= 5 $\text{kgf/cm}^2$ ) であった。

## 8. 雪上の摩擦

図 62 は北大低温科学研究所の藤岡が雪面と各種材料との間の摩擦特性を調べるのに用いた実験装置である。鉄製の回転円盤 A の上に円盤状に成形された雪の試料 B が凍着されている。回転軸の下方にプーリー C が付けられており、減速器 D を介してベルトでモーター E に連結されている。減速器はウォームギアであり、歯車の組み合わせにより、回転速度を数 10 分の 1 から 100 分の 1 に減速できる。またベルトによる回転の伝達部では、大小のプーリーの組み合わせにより、数倍から数分の 1 に回転速度が変えられる。

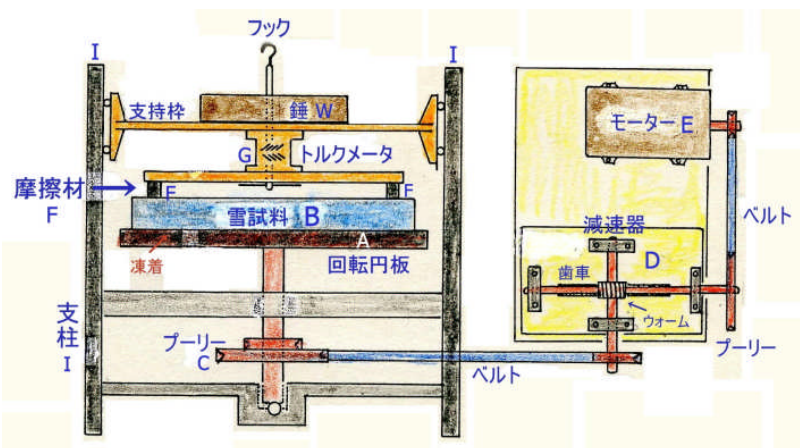
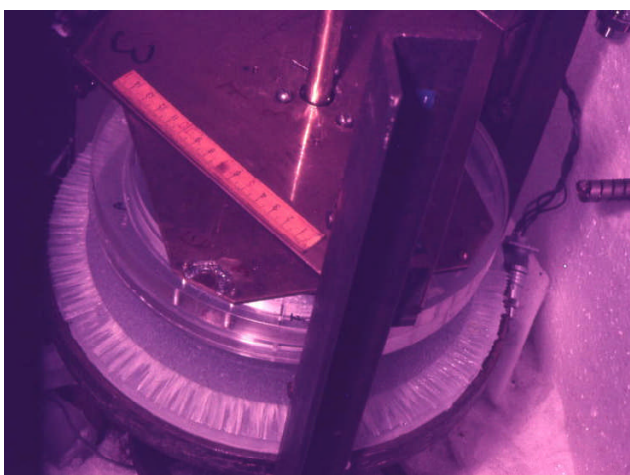


図 62 雪面（円盤状）とリング状摩擦材との摩擦（藤岡，1958）

(下)  
摩擦融解で発生した水が再凍結して放射状のツララを形成した

雪の試料 B の上にはリング状滑走体試料 F が乗せられる。この滑走体はトルクメーター（回転による捻りモーメント測定器）G を介して支持板 H につながれている。支持板はベアリングを介して 3 本の支柱 I の溝に沿って上下に自由に動くことができる。支持板の上面に錘 W をのせて、摩擦面に加わる荷重を調節する。支持板には吊り上げ用のフックがついていて、滑走体を雪面から離したり、支柱から取り外すことができる。



回転円盤が回り、滑走体を雪面に接触させると、摩擦の大きさに応じてトルクメーターを貼り付けたリングがごくわずかに捻れる。この捻れの程度はトルクメーターを構成するストレインゲージ（歪み検出器）の抵抗の変化となって現れる（計測ではゲージでブリッジを作り、電圧の差が読み取られる）。あらかじめ、摩擦面に加えた力と電位差の変化を調べておけば、この方法で摩擦抵抗を電氣的に自動記録できる。

ストレインゲージは極細の抵抗線であり、これが肉薄の円筒弾性管の側面に接着剤で貼り付けられている。円筒は温度によって伸び縮みし、上部の錘によって上下にも縮む。ゲージは 4 枚セットで貼り付け、ホイーストーンブリッジを構成する。ゲージは温度補償、荷重補償（温度変化や荷重変化の影響を受けない）されるよう貼り付けられる。実験装置は恒温箱の中に収められ、温度を変えた実験ができる。

(1) 荷重と摩擦抵抗の関係

図 62 の装置で錘を色々に変え、摩擦面に加わる荷重を 30~250N の間で変えた時の摩擦抵抗を図 63 に示した。摩擦抵抗は A, B, C のどの曲線においても荷重に比例し、この実験条件下ではアモントンの摩擦の法則が当てはまることを示した。

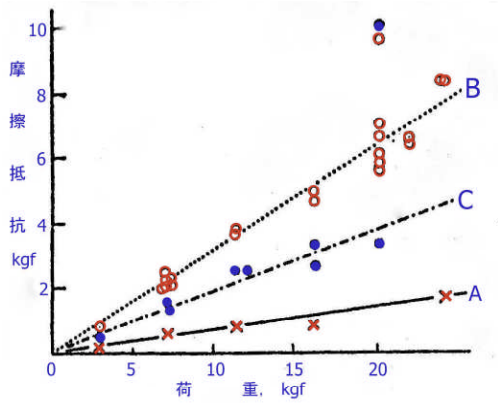


図 63 荷重と摩擦抵抗の関係 (藤岡,1962)  
 雪の回転円盤とリング状鉄との摩擦  
 A:  $-3^{\circ}\text{C}$ ,  $4.5 \times 10^{-6}\text{m/s}$   
 B:  $-24 \sim -28^{\circ}\text{C}$  ( $1.6 \sim 5.7 \times 10^{-6}\text{m/s}$ )  
 C:  $-26^{\circ}\text{C}$   $1.3 \times 10^{-2}\text{m/s}$

(2) 摩擦曲線の 3 つの型

温度と速度の広い範囲にわたって、摩擦を調べた結果、摩擦曲線には図 50 に示す 3 種の特徴的な波型 A, B, C が見いだされた。

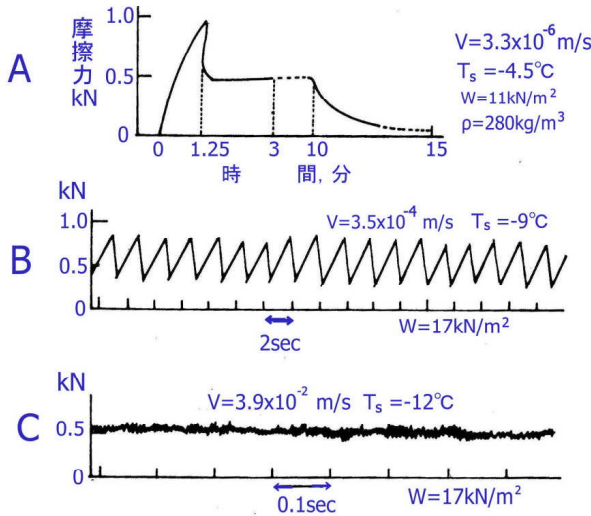


図 64 摩擦曲線の 3 つの型 (藤岡, 1962)

A 型：摩擦抵抗は連続的に、かつ緩やかに変動する。速度の小さい時に現れる。  
 B 型：摩擦抵抗は鋸歯状を描き、振幅が大きい。中程度の速度で現れ、 $-6^{\circ}\text{C}$  以上の温度では現れない。  
 C 型：摩擦抵抗は短い周期で、不規則な小さな変動を続ける。速度の大きい時に現れる。

これら 3 形式の摩擦曲線は鉄の輪およびアクリル (PMMA) の輪のいずれの摩擦においても現れる。速度と温度を変えた時の各型がどういう領域で現れるかを図 65 で示した。各太線は木下の得た積雪の柱の圧縮変形の形式と圧縮速度との関係に類似していた。

つまり、A 型は塑性変形に対応し、B 型は破壊変形、C 型は第二種破壊変形に対応する。B 型の鋸歯状の摩擦曲線は摩擦機構の基本特性の一つであるスティック・スリップ (付着-滑り) の運動を示している。このとき摩擦曲線の上端まで滑走体と雪面は付着し、一体となって進むが、上端に対応する摩擦力 (リングの捻れと逆向きに働く) に達したところで、滑走体は雪との付着が壊れ、急激な滑り (雪の回転と逆方向の滑り) を生ずる。この微視

的な付着・滑りの繰り返しが鋸歯状の摩擦曲線となっている。

### (3) 摩擦係数と温度，速度の関係図

温度を $-3 \sim -25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，速度を $5 \times 10^{-6} \sim 2 \text{ m/s}$ の間に変えて測定した摩擦係数の値が図 65 にプロットされている。図は PMMA の輪と雪面との摩擦結果である。×印は A 型，○印は B 型，●印は C 型を示している。

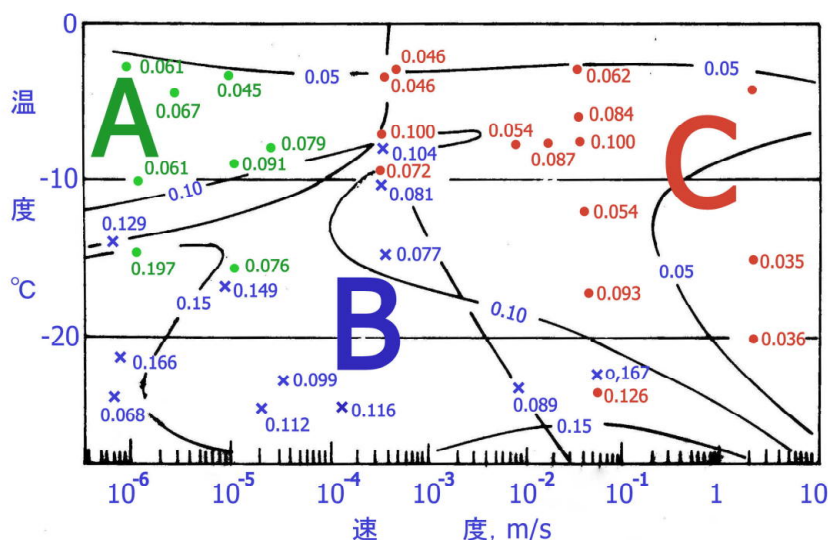


図 65 摩擦係数と温度，速度との関係（藤岡，1962）

摩擦係数は温度の高いほど小さく， $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ では速度に関係なく摩擦係数は 0.05 となっている。また， $1 \text{ m/s}$ 以上の速度では，温度に関係なく 0.05 程度の小さな値になっている。摩擦係数は 3 つの摩擦型式が交叉するあたりで 0.1 程度の大きな値になっていることも注目される。 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下，速度が小さいところで摩擦係数が増大しているのは，積雪のクリープ・塑性変形によって雪粒と摩擦板間の接触面積（真の接触面積）が増す効果が反映されたものと解釈される。この程度の低速度になると，摩擦板に接する接触面の塑性変形が顕著になり，速度の減少と共に真の接触面積が増す。一方，剪断抵抗も速度の減少と共に小さくなることが予想される。これらの二つの兼ね合いから，摩擦の増大や減少が決まる。たとえば， $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の高温では真の接触面の増大に比べ，摩擦材と雪粒間の付着の強さの減少の方が著しいため，摩擦係数が 0.05 程度の小さな値になったのであろう。

藤岡は熱伝導率の大きい鉄の輪についても図 65 と同様の図を作成した。鉄は PMMA より 300 倍も熱伝導率が高かったにもかかわらず，摩擦係数は常に PMMA より小さい値を示した。

### (4) 真の接触面

雪と摩擦する物質の表面は，その全面積が接触しているわけではなく，実際に接触している面はごく小部分に過ぎない。藤岡(1962)はこの真の接触面を観察するため雪のブロック（底面積  $20 \times 30 \text{ mm}^2$ ，高さ  $10 \text{ mm}$ ）を回転するガラス円盤上に滑らせた。図 66 のように，長方形の雪のブロックの上面からジュラルミンの枠を被せ，ジュラルミンの上面には梃子を利用して荷重を加えた。荷重変換器を介して摩擦抵抗力が測定される。見かけの圧力  $4.56 \text{ kPa}$ ，温度  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ ，速度  $69 \text{ mm/s}$  で 5 分間摩擦したとき，摩擦抵抗の平均値は  $1 \text{ N}$ ，



図 66 真の接触面の観察法(藤岡, 1962)

(回転するガラス円板やアクリル円板の上に雪ブロックを滑らせ、円板に接触した状態で雪の隙間に液体の補強材を充填し、温度を下げて凍結した後、接触面の上部の雪を切り取ったり削り取って真の接触面や摩擦面を観察する。)

摩擦係数は 0.36 であった。

摩擦終了後、雪を載せたままガラス板を取り出し、雪にアニリンを含ませる。-30℃に冷やし、アニリンが凍結したのを待って、金鋸でジュラルミンの板を切り離し、鉋をかけてガラスに付着する雪の厚さを 0.5mm とする。次いで、-10℃に温度を上げ、上面にカバーガラスを被せ、周囲を氷で囲って、アニリンの蒸発、氷の粒の昇華を防ぐ。これを裏返してみると、真の接触面の形状と個数を知ることが出来る。底面積 600mm<sup>2</sup> の中に 190 個の接触面があり、その総面積は 8.35mm<sup>2</sup> であった。一個当たりの平均は 4.4x10<sup>-2</sup>mm<sup>2</sup> で真の接触面の平均圧力は 330MPa となった。

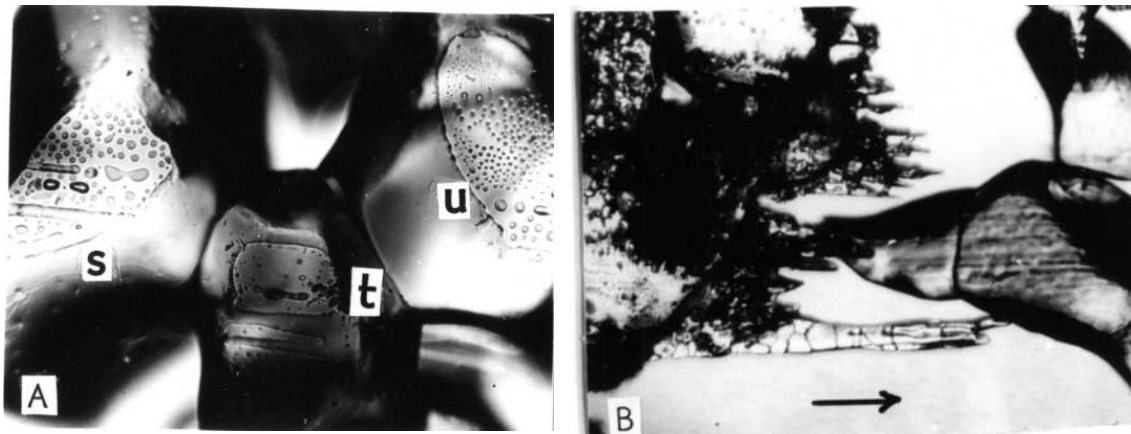


図 67 真の接触面(左：ガラス面との摩擦，右：アクリル面との摩擦)

荷重：0.27N，温度：-4℃，速度：69mm/s，5分間摩擦，雪の底面積：20x30mm<sup>2</sup>，高さ 10mm

藤岡は真の接触面を直径とする半球面が摩擦熱で融けたと仮定して、融解に要するエネルギー 0.2J を得た。それは全エネルギーのわずか 1.1%に過ぎなかった。

次に、ガラスの代わりにアクリル(PMMA)円板を用い、温度を-1~-2℃，速度を 97mm/s，見かけの接触面積は同じ 20x30mm<sup>2</sup>，荷重 2.5N として 5分間摩擦を行った。このとき図 60 に示す再凍結によって生じた細長い氷の棒が多数形成されていた。

アクリル (PMMA) で摩擦したとき、顕著な氷の棒の発生が認められた。摩擦係数の小



さい場合には、氷の棒の発生は少なく、逆に氷の粉の発生が多かった。ガラスの場合には氷の棒は形成されず、摩擦の大きいほど氷の粉の発生が多かった。

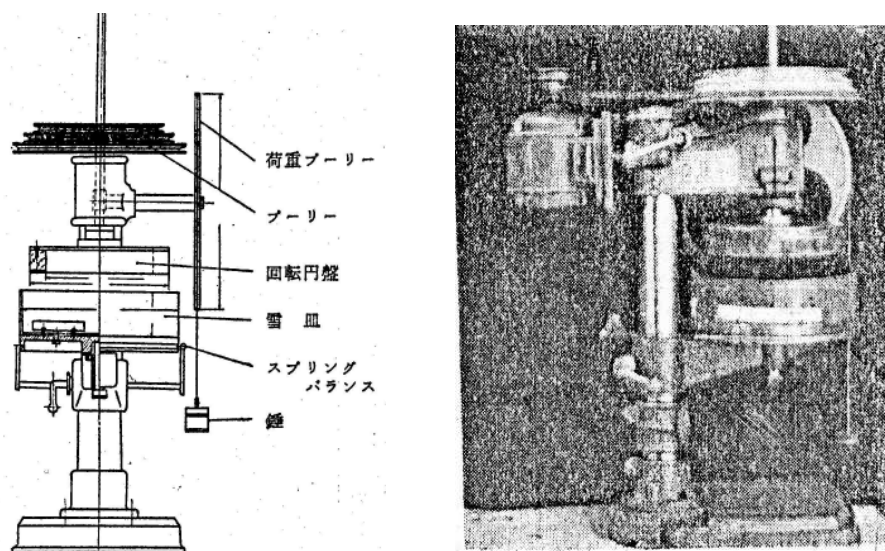
スキーの摩擦機構がパウデンらの主張する摩擦融解・水潤滑に起因するのなら、熱伝導率の大きい鉄がなぜ PMMA より小さいのか説明ができない。雪の真の接触面から小さなツララが発生していたことから摩擦融解は確認出来たが、摩擦が大きい場合にツララが発生し、融解によって発生した水が潤滑作用を果たし摩擦を小さくするという結果にはならなかった。藤岡は摩擦融解・水潤滑説では説明できないこのような結果を得て、摩擦融解・水潤滑説に疑問を抱いた。

雪面に放置されたスキーが一晩で雪面に固く凍り付いていることを経験して、藤岡は低温癒着説を提案している。低温癒着説によって摩擦の本質解明のごく近くに迫ったが、その後、藤岡は雪崩の研究に方向転換してしまった。

ここに示されたツララの形成と摩擦係数との関係が「摩擦融解・水潤滑説の論理的矛盾」であることに気付くには、対馬らの氷筍リンクの成果まで待たねばならなかった。

#### (5) 各種プラスチック材料と雪面の摩擦

美津濃(株)新保の摩擦装置(下図)はボール盤に加工を加えたもので、藤岡と類似の方法であるが、円盤状に成形した雪(静止)の上面に、回転するリング状試験片を接触させて摩擦を行い、雪試料側の回転モーメントから摩擦抵抗力を読み取った。新保は各種プラスチック材料やスキーワックスとの摩擦を温度、速度を変えて広範囲に調べている。



新保の雪円板と回転するリングとの摩擦装置(新保, 1959)

17 種類のプラスチック材料について摩擦を調べた結果、平滑面、粗面(粗さ 0.03~0.04mm)、微粗面(粗さ 0.01mm)の動摩擦係数は粗面より平滑面の方が大きかった。摩擦係数は 2.4m/s, 4.8m/s, 7.2m/s に速度を変えたとき速度の速いほどわずかに小さかった。0~20℃の温度領域では温度による動摩擦の変化も小さく、湿った雪になると摩擦がわずかに減少する場合と逆に増大するものがあった。

表 プラスチックの雪上の摩擦(平滑面と微粗面の動摩擦係数) (新保)  
 温度-21~23℃, 接雪圧 21gf/cm<sup>2</sup>, 速度 2.4m/s, しまり雪, 微粗面の粗さ 0.01mm

試料	平滑面	微粗面	試料	平滑面	微粗面
フッ素樹脂	0.05	0.04	エポキシ樹脂	0.06	0.05
ポリエチレン (低圧法コフィックス)	0.05	0.05	ポリウレタン	0.07	0.04
ポリエチレン (低圧法ハイゼックス)	0.05	0.04	ポリアミド (ナイロン)	0.08	0.06
ポリプロピレン	0.05	0.05	ポリ塩化ビニル	0.05	0.05
スチロールブタジエン 共重合体	0.05	0.05	セルロイド	0.07	0.06
スチロール・アクリロニ トリル・ブタジエン共重合 ポリカーボネート	0.05	0.04	メラミン樹脂	0.06	0.06
	0.06	0.04	アミノアルキッド	0.13	0.06
			アミノ樹脂	0.07	0.06
			フェノール樹脂	0.07	0.04
			フェノール (積層板)	0.07	0.04

上の表で-22℃という低温にも拘わらず、摩擦係数が 0.04 ~ 0.08 程度と小さいのが注目される。微粗面 (粗さ 0.01mm) に比べ平滑面の摩擦が大きい理由として、平滑面では真の接触面積が微粗面の場合より増大することから説明される。

表 動摩擦係数に及ぼす気温の影響 (新保)

接雪圧 21gf/cm<sup>2</sup>, 速度 2.4m/s, 雪質: しまり雪およびぬれしまり雪, 微粗面: 粗さ 0.01mm

試料	-17~-23	-11~-13	+1.5~2	試料	-17~-23	-11~-13	+1.5~2
フッ素樹脂	0.04	0.03	0.02	ポリウレタン	0.05	0.03	0.06
ポリエチレン	0.05	0.04	0.03	ポリアミド	0.04	0.04	0.07
ポリプロピレン	0.06	0.04	0.03	ポリ塩化ビニル	0.04	0.03	0.08
スチロールブタジ エン共重合体	0.05	0.03	0.09	セルロイド	0.06	0.05	0.08
スチロール・アクリロ ニリル・ブタジエン 共重合体	0.05	0.03	0.08	メラミン樹脂	0.05	0.05	0.05
				アミノアルキッド	0.06	0.05	0.10
				アミノ樹脂	0.06	0.04	0.11
				フェノール樹脂	0.04	0.03	0.07
ポリカーボネート	0.04	0.03	0.04	フェノール (積層板)	0.04	0.03	0.11
エポキシ樹脂	0.05	0.03	0.07	アミノ (積層板)		0.14	0.08

上表の気温を-20℃~+2℃に変えた測定ではしまり雪の-20℃と-12℃を比較すると気温の高い方が若干摩擦係数が小さくなっている。しかし、これらのしまり雪と気温が+2℃のぬれしまり雪を比べると、ぬれしまり雪の摩擦が若干小さくなる材料と逆に顕著に大きくなる材料のあることが示されている。

新保(1951-1971)は雪の低摩擦機構について、各種プラスチック材料やスキワークスに関する豊富な測定を通してパウデンらの主張する摩擦融解・水潤滑説を定性的に支持している。しかし、新保の摩擦測定値が水潤滑として吟味されることはなかった。ここでは、上表の測定値が水潤滑から発生していると仮定して検討しよう。実験では単位面積(1cm<sup>2</sup>)当たりの荷重が 21gf(=0.2N), 摩擦係数は 0.02~0.08 だから、単位面積(1cm<sup>2</sup>)当たりの摩擦力は  $f = 0.004 \sim 0.018N$  である。雪面の雪粒が滑走面と真の接触をしている部分で摩擦が発生するが、この真の接触面積は測定されていない。そこで、氷のブリネル硬さ(表 14)を参考に-20℃で 100MN/m<sup>2</sup> とすると、1cm<sup>2</sup> 中の真の接触面積は  $S = 0.2N / (10^8 N/m^2) = 2 \times 10^{-9} m^2$  と見積もられる。速度は 2.4m/s だから、水の粘性による抵抗は水膜厚さを  $d$  として  $\eta (V/d)S$  であり、こ

れが摩擦抵抗  $f$  に等しい。水の粘性係数は  $\eta = 1.78 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$  であるから、

$$(1.78 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}) [(2.4 \text{m/s})/d] (2 \times 10^{-9} \text{m}^2) = 0.004 \sim 0.018 \text{N}$$

となるので、水膜厚さ  $d$  を  $d = (2.1 \sim 0.5) \times 10^{-9} \text{m} = 0.5 \sim 2.1 \text{ nm}$  と分子の大きさ程度と仮定していたことになる。水膜がこれほど薄い領域で摩擦材によって厚さが変わることにより摩擦係数が変わるとするのは考えにくいし、雪面に形成される摩擦痕も識別できないだろう。このように、新保の摩擦測定値を水潤滑による抵抗として説明するには無理がある。さて、新保の摩擦測定値を水の関与しない固体摩擦と仮定して真の接触面の剪断強さ  $s$  を見積もってみよう。

$$s = f/S = (0.004 \sim 0.018 \text{N}) / 2 \times 10^{-9} \text{m}^2 = (2 \sim 9) \times 10^6 \text{Pa}$$

となり、氷の剪断強さ(表 17)と一致する。つまり、新保の摩擦測定値は凝着説で説明出来るのであり、定性的な面から摩擦融解・水潤滑に説明を求めたのはパウデンらの氷や雪の摩擦に関する研究業績を尊重した結果とも受け取れるが、摩擦融解・水潤滑の呪縛から脱しきれなかったものとも推測できる。

## 9. 単結晶氷の摩擦と氷上の摩擦機構

雪・氷の上ではスキー・スケートが非常によく滑るのに、金属板・ガラス板・コンクリートの上では全く滑ることができない。この滑りの違いは何によるのだろうか。そして、氷上で物がよく滑る原因は何によるのだろうか？ 100 年来の大問題である氷の滑り機構について、ジョリー (Joly,1886), レイノルズ (Reynolds,1899) の先駆的学説以来、バウデンら (1939) の有名な摩擦融解・水潤滑の学説を経て、数多くの研究がなされてきたが、今日なお十分な解決をみるに至っていない。

一般の固体物質間の摩擦 (動摩擦係数  $\mu_k$ ) が 0.5 内外、油を塗った面で 0.1, 流体潤滑で 0.05 内外であるのに比べ、氷と他物質間の摩擦は 0.05 ~ 0.005 内外と極めて小さい。この値は金属間の摩擦形式から類推すると流体潤滑の摩擦に対応する値である。このような類推が手伝って、ジョリーやレイノルズは「スケートが氷に加える圧力で発生する解け水が潤滑作用をする」と考えたし、ワインベルグ (Weinberg,1936) やバウデンら (Bowden & Hughes,1939) は摩擦の際に発生する熱で水が発生し、その水が潤滑作用をすると考えた。これらの両説はその後、非常に有名となった。圧力融解・水潤滑説については圧力が実際に融解を生じさせるほど大きくなるかどうか疑問が持たれ、また、融解に必要な熱の供給が間に合うのかにも疑問がもたれた。その後、氷の状態図から圧力融解には  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  という限界温度の存在することが指摘され、極めて融点に近い温度領域を除いては圧力融解・水潤滑説の適用は否定された。

1939 年以降は、摩擦融解・水潤滑説でスキーやスケートの滑りが説明されるようになった。1990 年代にいたってもなお摩擦融解・水潤滑説の理論的発展が進んでいる。しかし、その一方で、1950 年以降、バウデンらが摩擦融解・水潤滑説の根拠とした実験事実のうち

①速度効果

②滑走材の熱伝導率の効果

の二項目に対して矛盾する結果も報告されてきたのである。

先ず、摩擦面の温度上昇を無視できる程度の低速で滑らせても、シュルツとクナップワースト (Schultz & Knappwost,1968), テーバーとワルカー (Tabor & Walker,1970), バーネス (Barnes) (1971), 対馬 (1976) らは依然として小さな動摩擦係数  $\mu_k$  を得ていて、低速になると通常の金属間摩擦と同程度に摩擦が増大するとしたバウデン等の主張は一般には当てはまらないことが示された。

次に、熱伝導率の効果についても、マコニカ (McConica,1950), ニーブン (Niven,1956), 藤岡 (1956) らのプラスチックや金属滑走体と氷や雪との摩擦は、熱伝導率のよい金属でも熱伝導の悪いプラスチック材と同程度の小さな摩擦が得られ、 $\mu_k$  と熱伝導率との間には特別な関係が見い出されなかった。その後、エバンス (Evans,1976) らの解析は摩擦におよぼす滑走体の熱伝導率の影響が極めて小さいことを指摘している。つまり、バウデンらのいう熱伝導効果は一般には成り立たないものと考えられる。

プファルツナー (Pfalzner,1947) はソリを加熱させながら滑らせても、加熱の効果があまり検出されないことから摩擦融解説に疑問を示した。マコニカは金属性のマグネシウムスキーが非常によく滑ることを見出し、水蒸気潤滑説を提唱した。赤熱した鉄板の上に落とされた水滴が鉄板の上に浮き上がり、激しく振動する。これは水滴の下面が加熱され

水蒸気が噴射して、水蒸気の上に水滴が浮き上がることによる。スキーも同様に水蒸気の膜の上に浮き上がれば摩擦は殆どなくなることになる。

ワイル(Weyl)は融点に近い温度の氷の表面は固体の構造が露出しているのではなく、固体と液体の中間の分子配列の構造になることを理論的に示した。この表面層を疑似液体膜(Quasi-liquid layer)という。ワイルは氷の表面にある疑似液体膜が潤滑作用をするのではないかという考えを出している。ワイルの論文は氷の表面構造としての疑似液体膜を理論的に導いたものであり、疑似液体膜がスキー・スケートの滑りのよいことに関係しているのではなからうかという考えに言及したものである。これは、氷の摩擦結果を定量的に説明したものではないことを注意したい。

対馬(1976)は単結晶氷上に剛球を滑らせる実験から、氷上の摩擦特性を明らかにし、これらの諸説に対する論議を行い、凝着説で氷の低摩擦を説明できる可能性を指摘した。

氷雪の摩擦の学説ではほとんどの場合、摩擦を小さくする原因が探究されてきた。学説は摩擦の測定値を定量的に説明できることが大事である。今日、有力な学説としては摩擦融解説と凝着説の二つに絞られてきたが、未だ混沌の状態にあるようである。

摩擦の真の機構が解明されるには、摩擦の値や摩擦特性が定量的に説明される必要がある。以下に述べる単結晶氷を用いた摩擦の実験は、凝着説によって摩擦結果の定量的説明を試みたものである。

### 9.1 氷球と平滑面の摩擦（せん断の摩擦）

オプティカルフラットな表面に半球状の氷をのせ、荷重を加えると、荷重の大きさと荷重を加えている時間によって先端（接触面）での氷の塑性変形が進行するから、接触面積が拡大する。このとき摩擦面に形成される見かけの接触面積は塑性変形によって氷の先端が潰れて形成されるため真の接触面に等しくなる。

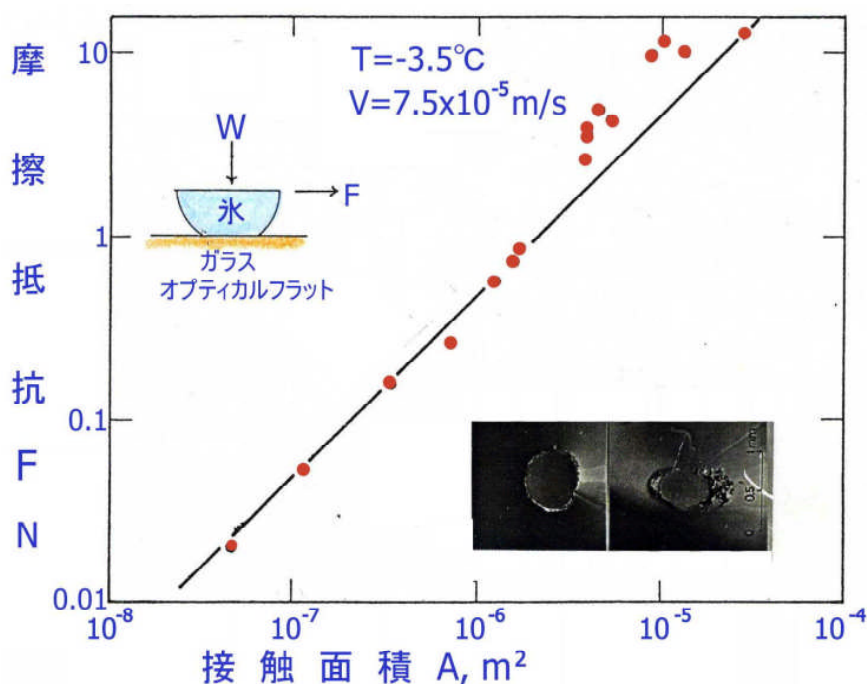


図 68 オプティカルフラットなガラス板の上の氷球の摩擦

滑った直後の氷の先端を顕微鏡で観察すると、球面の先端に平滑面が認められる。この平滑面の長径および短径を計測して、接触面積が算出される。図 68 には半径 3.2mm の球面をオプティカルフラット（表面粗さ 0.2 μm）のガラスの上に滑らせたものである。温度-3.5 °Cで荷重を 1 ~ 20N,接触時間をいろいろに変えて、接触面積が 0.5 ~ 30mm<sup>2</sup> に変えられた。摩擦速度は 7.5×10<sup>-2</sup> mm/s であった。

図 68 の直線の傾きは 1 なので、摩擦力 F は接触面積 A に比例し、

$$F = A \cdot s \tag{29}$$

で表される。

図 68 の場合、界面せん断強さ s は 0.5MPa(= 5gf/cm<sup>2</sup>)であった。

## 9.2 鋼球と単結晶氷（平板）の摩擦

氷は粘弾性体である。それゆえ、一定荷重を加えても真に摩擦の起こる面積、つまり真実接触面は接触時間（摩擦速度）によって変化する。単結晶氷の粘弾性は図 69 の 4 要素モデルによって表される(若浜,1957)。構成要素のヤング率および粘性係数は温度に強く依存し(Jellinek & Brill,1956 ; 黒岩・河村,1974)、氷の結晶方位によっても多少異なる(Bass,1957)。これらが摩擦の際に最も重要となる真実接触面積の決定に大きな影響を及ぼすわけで、結局、氷の摩擦は速度、温度、氷の結晶面および荷重に依存することになる。たとえば、高速度では主に E<sub>1</sub> による弾性的挙動を示すであろうし、また極端な低速ではマックスウェル要素の粘性項 η<sub>1</sub> が大きな働きをして、接触面積が拡大し、その結果、せん断抵抗や掘り起こし抵抗が増大するであろう。

剛体球面と氷の摩擦では、接触面積が荷重に比例して増大する場合でも、滑走体が氷にめり込んで氷に溝を掘ってゆく、溝の断面積は荷重の 3/2 乗に比例して増大するから、荷重が大きくなると溝掘りの抵抗を無視できなくなる。結局、摩擦係数は荷重と共に増加することになり、アモントンの摩擦の法則が成り立たなくなることが予想される。

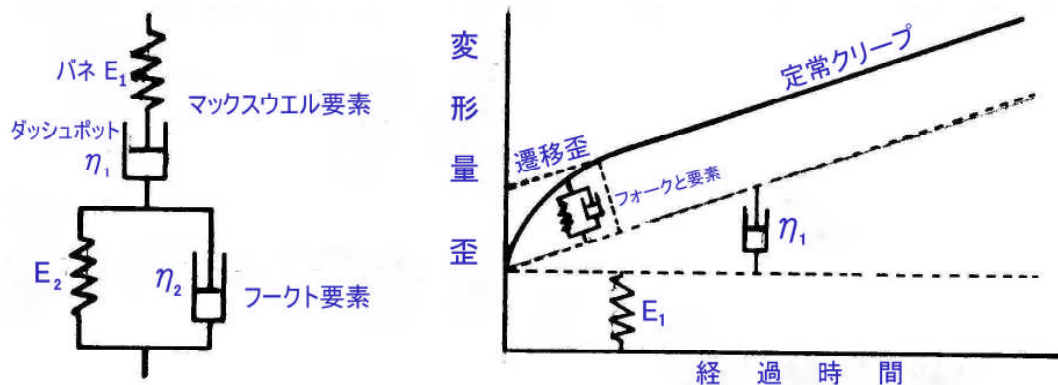
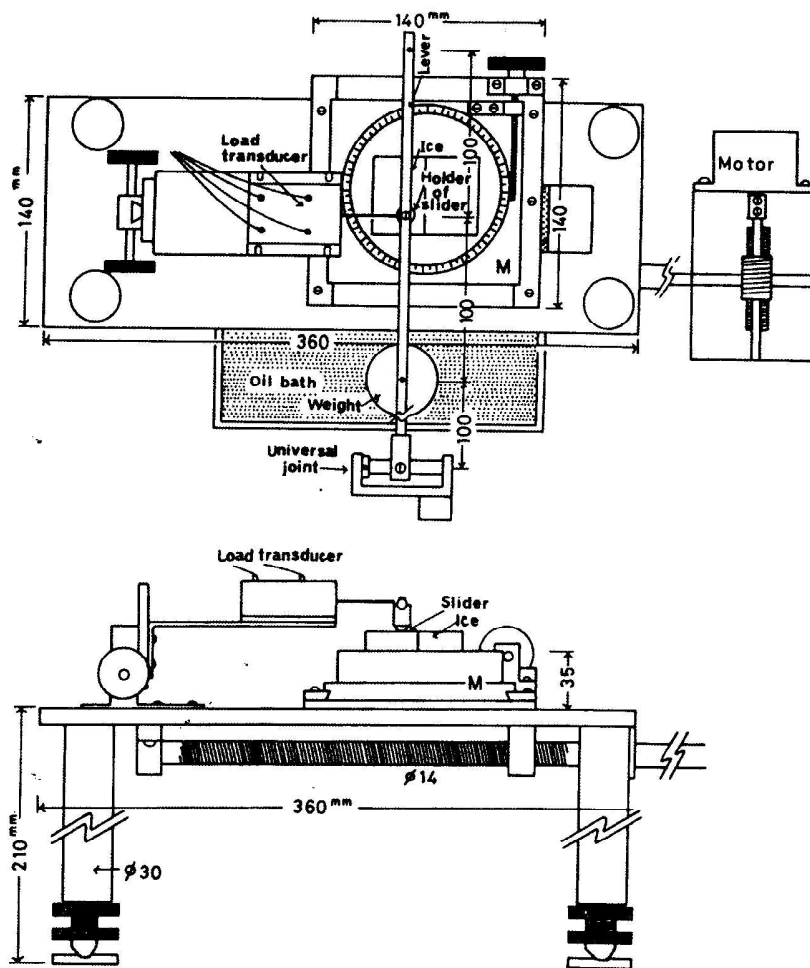


図 69 氷の粘弾性模型

摩擦速度は極端に遅い場合には図 69 の定常クリープ領域に続く加速クリープ(遷移領域)に達することも予想される。この加速クリープの領域では氷の再結晶過程が顕著に発生する。摩擦の速度依存性を解釈する上で注意を要する点である。



単結晶氷の摩擦異方性検出に使用された摩擦装置

### (1) 荷重効果

金属間の摩擦係数は非常に広範囲の荷重に対して一定値を示す (Whitehead,1950; Bowden & Tabor 1939)。しかし、氷では荷重の大きい領域でアモントンの摩擦の法則の成立しなくなることがアーノルド・アラビーエフ (Arnold-Arabief,1936), ニーブン (Niven,1958) 其他の人々により指摘されている。図 70 には摩擦速度  $7.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ , 温度  $-10^\circ \text{C}$  で荷重を 1 から 31N まで変化させたときの動摩擦係数  $\mu_k$  の値, および接触面積  $A$  と荷重  $W$  の比, 掘り起こし断面積  $A^*$  と  $W$  との比を示した。詳しい測定値は表 11 に示されている。

$\mu_k$  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共に増加した。そして, 氷の柱面(10 $\bar{1}0$ )上の摩擦は底面(0001)上の値より 2 倍近く大きかった。剛体球が相対的に軟らかい氷の上を滑っているので, 接触面積が荷重に比例する場合でも, 摩擦痕の溝の断面積は荷重の 3/2 乗に比例して増大する。したがって, 摩擦係数は界面せん断による項  $\mu_s$  と掘り起こしの項  $\mu_p$  の和として表わされる。

$\mu_p$  の項の寄与が大きくなるような荷重領域では当然のことながら  $\mu_k$  は増大するわけである。

図 70 の右図を見ると、 $A/W$  は全荷重に渡ってほぼ一定値を示しているが、掘り起こしに関する  $A^*/W$  は荷重の増加と共に著しい増大を示している。それゆえ、図 70 の左図は

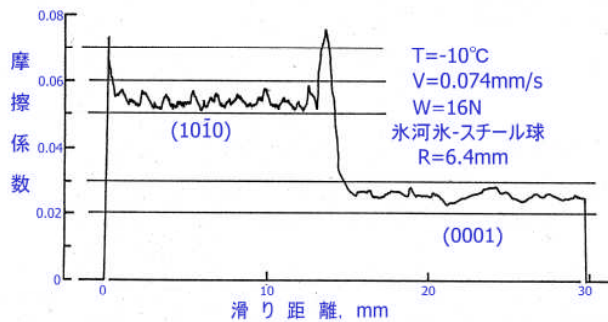


図 70 氷の柱面(1010)と底面(0001)上のスチール球(直径 6.4mm)の滑り温度-10℃, 速度 0.074mm/s, 荷重 16N

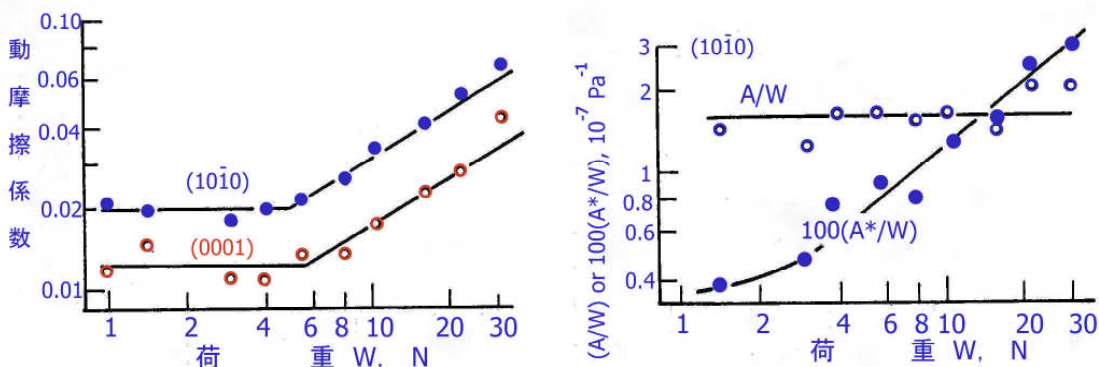


図 71 荷重効果  $V=7.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ,  $T=-10^\circ\text{C}$ ,  $R=6.4 \text{mm}$

荷重の小さいところでは  $\mu_s \gg \mu_p$  となるため  $\mu_k$  はほぼ一定値を示すが、荷重の大きい領域では掘り起こしの摩擦  $\mu_p$  の寄与が  $\mu_s$  を上回るようになって  $\mu_k$  の増大が生じたと解釈される。

速度が遅い場合の図 70 では、 $\mu_k$  が一定となる荷重領域が狭い。低速では氷のクリープがより顕著となり  $\mu_p$  が大きな値を占めるようになるためである。同様の効果は静摩擦から動摩擦への移行の際にも現れる。スキーやスケートで滑りだしの抵抗が著しく大きいのは接触面積の拡大や氷面へのめり込みによっている。

荷重特性で摩擦係数が一定にならないのは、球面の滑走体が氷の表面にめり込むことによって生じている。荷重の大きいところでは、掘り起こしの抵抗の方がせん断の抵抗を上回るようになった。剛球スライダーが氷に傷を作っていくのだから、滑走体が深くめり込んでいるように思われがちであるが、実際の深さは数  $\mu\text{m}$  から  $20\mu\text{m}$  程度の大変浅いものであることを注意しておきたい。

## (2) 速度効果

すでに述べたように、氷の粘弾性的性質は速度による摩擦の変化に最も顕著に反映されるはずである。たとえば、極端な高速では氷は弾性的となり、接触面積が減少して摩擦が小さくなるであろうし、一方、非常に低速では氷の粘性が強く反映されて、氷表面への鋼鉄球のめり込みが大きくなって、摩擦が増すであろう。これらの点を明らかにするため、温度と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 14N, 温度を  $-10^\circ\text{C}$  とし、速度を  $1.8 \times 10^{-3} \text{m/s}$  から  $1.5 \times 10^{-7} \text{m/s}$  まで変えたときの結果を図 72 に示した。



$\mu_k$  は速度の大きいほど小さな値を示したが、 $10^{-5}$  ないし  $10^{-3}$  m/s 以上では速度に無関係にはほぼ一定値を示した。この摩擦曲線は右下図に示した摩擦痕の幅の測定値と非常によい相関を示している。たとえば、 $\mu_k$  が一定の領域は摩擦痕の一定となる領域であり、摩擦痕幅の増大とともに  $\mu_k$  が増大している。

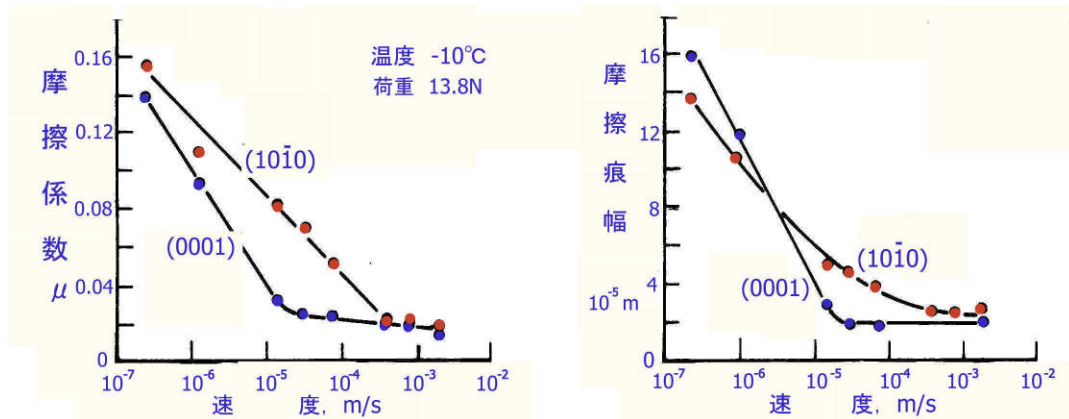


図 72 速度効果

氷の滑り面は(0001)であるから、(0001)面および $(10\bar{1}0)$ 面は垂直力に対して最も変形し難い面である。しかし、氷に大きな変形が加えられれば、それらの面に再結晶やクラックが誘発され、クリープが生じ易くなる。この再結晶の誘発される速度は柱面よりも底面の方が遅い速度側にある。そのため、底面上の  $\mu_k$  一定となる速度が柱面上のものより小さいのである。一般に、氷の底面上の  $\mu_k$  が他のどの面上の  $\mu_k$  より小さいのは、底面が最も硬い面であると同時に滑り面にもなっていることが、掘り起こし抵抗やせん断抵抗を他のどの面よりも小さくしていることによって理解できる。

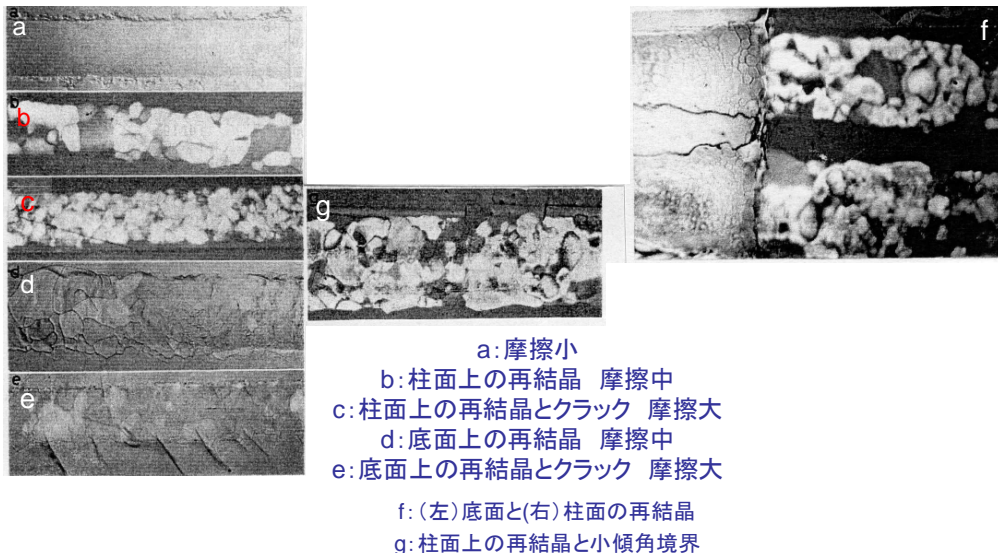


図 73 氷の表面に刻まれた摩擦痕

### (3) 温度効果

流体潤滑説の根拠の一つとして、温度の低下に伴う摩擦の増大が挙げられてきた。温度

が低くなると圧力や摩擦熱による氷の融解が生じ難くなるためと考えたのである (Reynolds,1899;Bowden & Hughes,1939)。しかし、上の事実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、流体潤滑説や凝着説、およびその他の説でも定性的な説明は可能だからである。たとえば、ジェリネーク (Jellinek,1957) およびララテイとテーバー (Raraty & Tabor,1958) 等の付着実験から示されるように、温度の低下は界面せん断強さの増大をもたらす、摩擦の温度依存が疑似液体膜や凝着説によっても説明できる可能性を示している。図 74 に荷重と速度を一定にして、温度を低い方から高い方へ変えていったときの動摩擦係数および摩擦痕の幅を示した。

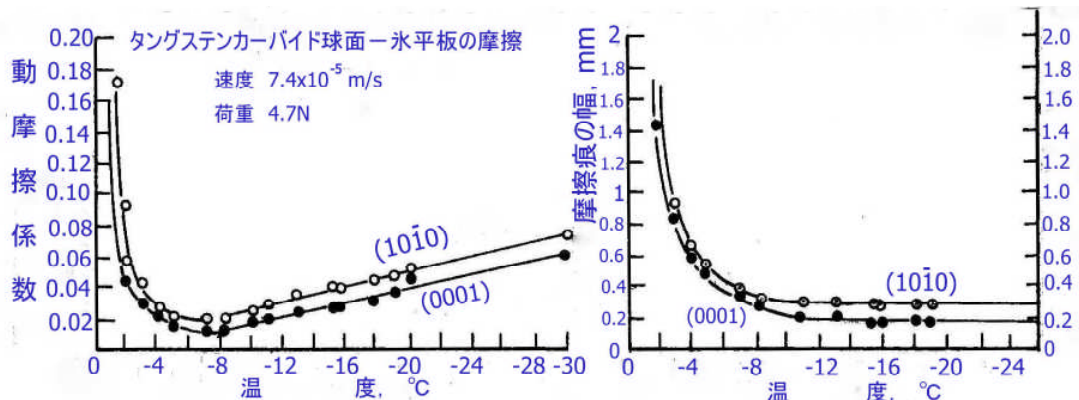


図 74 温度効果

(0001)面および(1010)面の両面上では $\mu_k$ は $-7^\circ\text{C}$ 付近に極小をもち、それより高い温度でもまた低い温度でも $\mu_k$ は増大した。 $\mu_k$ の極小を与える温度は高速になると低温側へ移動した。たとえば、 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ の温度における $\mu_k$ 極小の温度は(1010)面で $-4^\circ\text{C}$ であった。

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、 $-7^\circ\text{C}$ 以上では溝幅が急速に拡大した。したがって、溝幅の増大が $-7^\circ\text{C}$ 以上での摩擦の増大をもたらしたと考えてよいだろう。 $-7^\circ\text{C}$ 以下の温度では接触面積にほとんど変化がないが、いくぶん減少する傾向にある。したがって、この領域の摩擦は接触面積だけでは説明できない。すでに述べた氷の付着強さの温度依存、あるいは対馬・藤井(1973)の氷のせん断強さの温度依存によって説明されるべきであろう。

#### (4) $\mu_k - V(\text{速度}) - W(\text{荷重})$ 図表

以上 (2)~(4) の結果から、氷の摩擦は速度(V)、荷重(W)、温度(T) および結晶面等に著しく依存することがわかった。これら全てを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と速度を変えたときの摩擦の変化を示したのが図 76 である。

動摩擦係数 $\mu_k$ は0.005 から0.16まで広範囲にわたって分布しているが、最大の $\mu_k$ をとっても金属間の摩擦( $\mu_k=0.5$ )に比べると非常に小さい。 $\mu_k$ は荷重の小さいほど、また速度の大きいほど小さく、全ての条件下で底面は柱面より摩擦が小さかった。

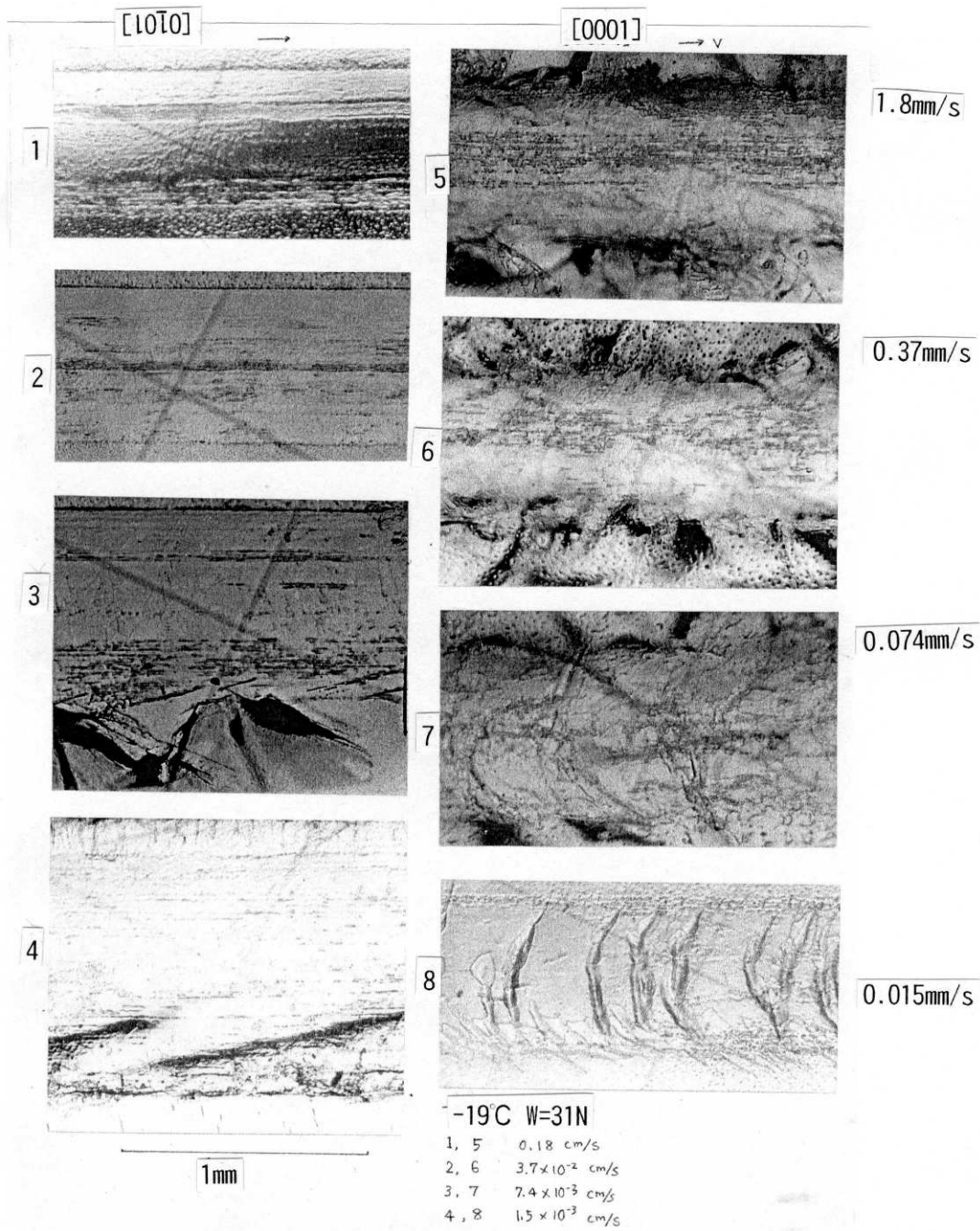


図 75 氷の摩擦痕

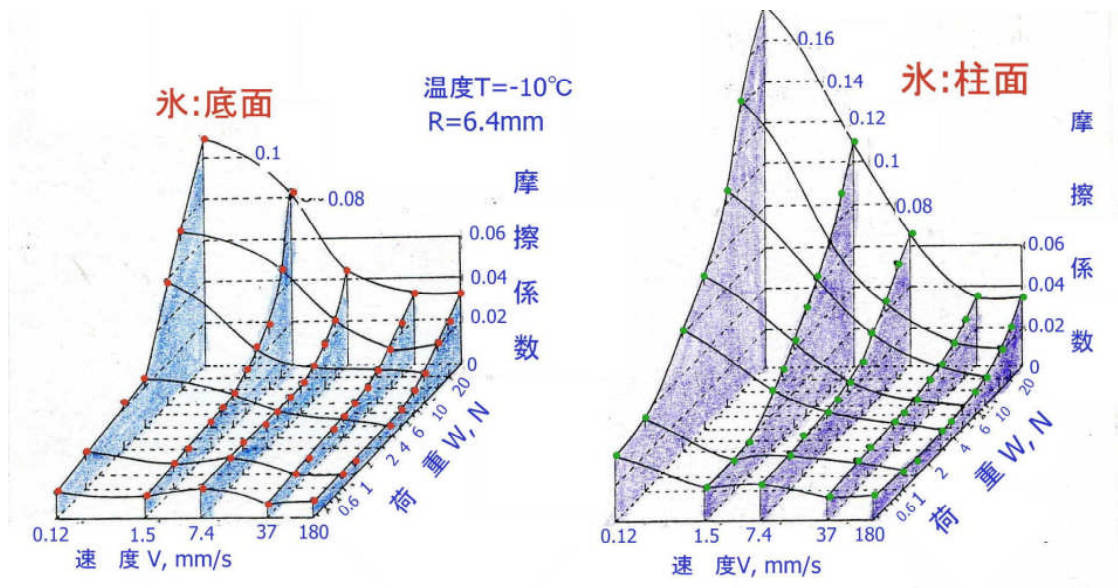


図 76  $\mu_k - V(\text{速度}) - W(\text{荷重})$  図表  
 左:(0001) 面上の摩擦, 右:(10 $\bar{1}$ 0) 面上の摩擦

### (5) 摩擦痕

氷の摩擦機構を解明する上で、摩擦痕の測定・観察が重要となることを前に述べた。摩擦痕の幅はせん断抵抗や掘り起こし抵抗を決定する上で重要であり、再結晶やクラックその他の変形は同一結晶面上の滑り方向による摩擦の異方性を議論する際に重要になる。摩擦痕の幅は荷重、速度、温度によって異なり、摩擦痕内およびその付近には再結晶、クラック、滑り線、小傾角境界など観察されることがある。

表 11 摩擦面の諸特性

荷重 N	動摩擦係数 $\mu_k$	摩擦痕の幅 $10^{-4}\text{m}$	接触面積 $10^{-6}\text{m}^2$	平均圧力 $10^7\text{Pa}$	溝の断面積 $10^{-8}\text{m}^2$
1.4	0.020	1.6	1.6	14	0.0056
3.0	0.018	2.2	1.9	15	0.015
4.0	0.021	2.9	3.3	12	0.031
5.5	0.022	3.4	4.6	12	0.052
8.0	0.026	3.7	5.3	15	0.065
10.5	0.036	4.7	8.9	12	0.14
16.0	0.043	5.8	13.2	12	0.25
22.0	0.057	7.5	22.3	10	0.56
31.0	0.070	8.8	30.2	10	0.88

表 11 には温度(-10℃)、速度( $7.4 \times 10^{-5}\text{m/s}$ )を一定にして荷重を変えたときの摩擦痕の

幅および接触面積と接触面の圧力、掘り起こし（溝）の断面積を示した。

接触面積  $A$  は溝幅を  $\phi$  として、

$$A = \pi (\phi/2)^2 \kappa \quad (30)$$

で表される。ただし、 $\kappa$  は接触面の粘弾性特性に依存するいわば形状因子で  $0.5 \leq \kappa \leq 1$  の範囲にある。表では  $\kappa=0.5$  として計算されている。表から接触面積が 30 倍に変化しても接触面の平均圧力は  $12\text{kgf/mm}^2$  内外の一定値を保つこと、これに対し溝の断面積は 160 倍も変化することがわかる。

### (6) 滑走体の寸法効果

温度、荷重、速度などが同一条件にあっても、滑走体の大きさによって  $\mu_k$  の異なることが予想される。滑走体の直径が小さくなれば、滑走面のめり込みが深くなり掘り起こし抵抗の増大によって摩擦が増大するであろうし、逆に滑走体直径を十分大きくすれば滑走体のめり込みは浅く純粋のせん断に近い摩擦が実現されると考えられる。

図 77 に荷重を  $4.75\text{N}$ 、速度を  $7.4 \times 10^{-5}\text{m/s}$  として、滑走体の直径  $R$  を  $1.6 \times 10^{-3}\text{m}$  から  $1.27 \times 10^{-2}\text{m}$  まで変えたときの摩擦を示した。 $R = 9.5 \times 10^{-3}\text{m}$  以下では  $\mu_k$  は  $R$  の減少とともに増大し、特に  $R = 3.2 \times 10^{-3}\text{m}$  以下で著しく増大した。しかし、 $R = 9.5 \times 10^{-3}\text{m}$  以上では  $(10\bar{1}0)$  面と  $(0001)$  面の  $\mu_k$  はほとんど等しく、 $\mu_k$  は一定値を示した。この  $\mu_k$  一定の領域を純粋のせん断による摩擦とみなすと、せん断強さ  $s$  を計算できる。この場合、

$$s = 1.1\text{MPa} (=0.11\text{kgf/mm}^2) \quad (31)$$

となる。

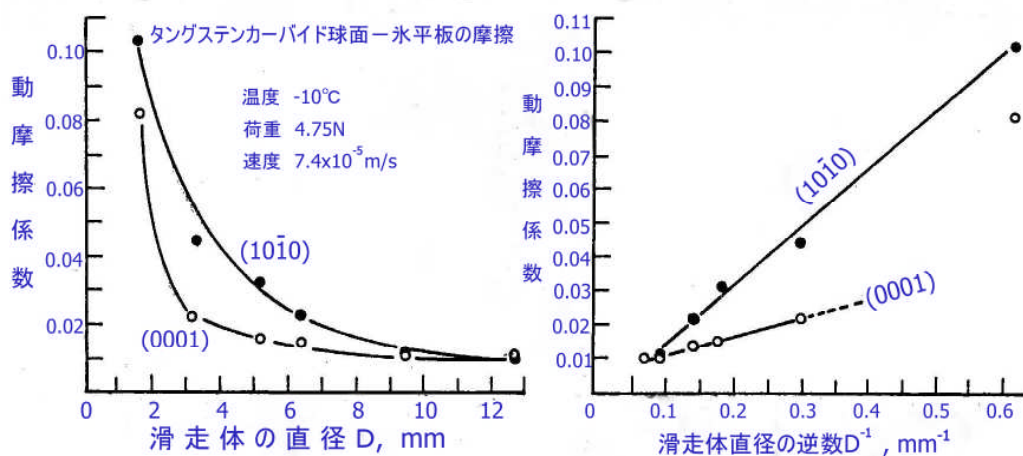


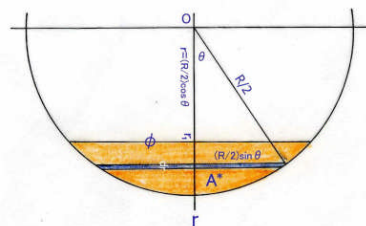
図 77 滑走体の寸法効果

#### 球面滑走体(直径 $R$ )による摩擦痕断面積 $A^*$ の計算法

断面積は  $A^* = 2 \int_r^{r_1} [(R/2) \sin \theta] dr$  である。 $r = (R/2) \sin \theta$  の関係にあるから、両辺を微分し  $dr = (R/2) \sin \theta d\theta$  なので、 $A^* = (R^2/2) \int_0^\theta \sin^2 \theta d\theta$ 、ここで  $\cos 2\theta = 1 - 2\sin^2 \theta$  より  $\sin^2 \theta = (1 - \cos 2\theta)/2$  の関係を代入して積分すると、 $A^* = (R^2/4) [\theta - (1/2)\sin 2\theta]_0^\theta$  を得る。ここで角度  $\theta$  が小さいとき  $\sin 2\theta \approx (2\theta) - (2\theta)^3/3!$ 、 $\theta \approx \phi/R$  の関係のあることを用いると、

$$A^* = R^2 \theta^3/6 = \phi^3/(6R) \quad \text{を得る。}$$

図 77 の場合、 $\phi$  はほぼ一定だから、断面積は滑走体の直径  $R$  に反比例することになり、摩擦係数は図 77 右図のように滑走体の直径の逆数に比例する。



本節に述べてきたことの多くに滑走体のめり込みが深く関与しているので、摩擦痕の幅  $\phi$  とめり込み深さ（最大深さ） $d$  の関係を図 78 に示す。

図中の図で、球の直径を  $D$  とすると、

$D > d$  なので、

$$(\phi/2)^2 = (D - d)d = Dd \quad (32)$$

したがって、

$$d = (\phi/2)^2 / D \quad (33)$$

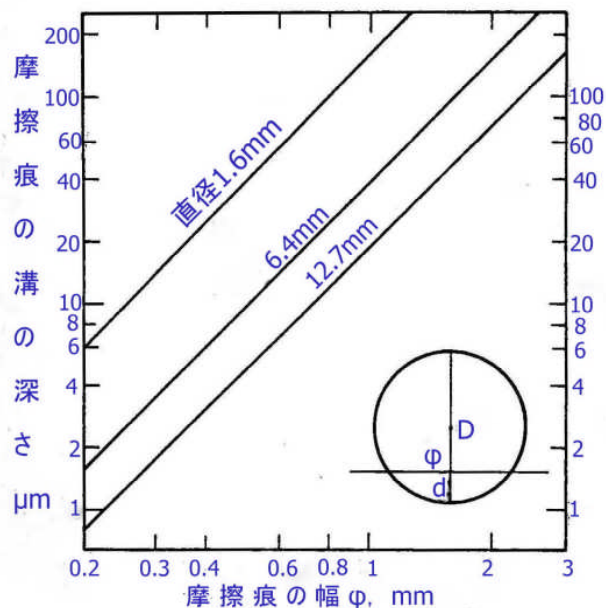


図 78 摩擦痕の幅  $\phi$  とめり込みの深さ  $d$  の関係

### (7) 氷の結晶面による摩擦の異方性

単結晶氷から 5 つの異なる結晶面をもつ氷ブロックを切りだし、直線状につないだ氷試料を作った。図 79 はその氷試料上に直径 4mm のタングステンカーバイドの球面を滑らせたときの摩擦曲線の記録である。荷重 4.75N のとき、氷の結晶面毎に摩擦は異なり、(0001)面が最低、(10 $\bar{1}0$ )面が最も大きく、摩擦は 2 倍も異なった。荷重を 2 倍の 10.4N に変えたとき、摩擦も各結晶面上で 2 倍に増えたが、結晶面による違いは荷重の小さいときと同様であった。この場合、摩擦条件は全く変わらないのに、氷の結晶面によって摩擦が異なった。しかし、摩擦係数は 0.02 ~ 0.05 と小さかった。

図 80 は各種の結晶面について摩擦を測定した結果を図表に示したものである。結晶面の指数は示されていないが、各結晶面のエッチピット(フォルムボールを二塩化エチレンに溶かした液をレプリカ液といい、この液を氷の表面に塗って作られたエッチピット(蒸発ピット)の形から、おおよその結晶面が推定される)の形状を示した。

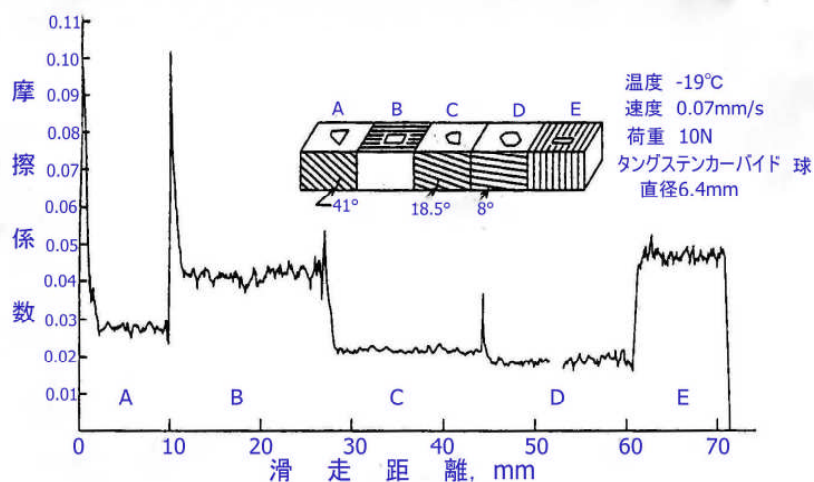


図 79 結晶面による摩擦の異方性

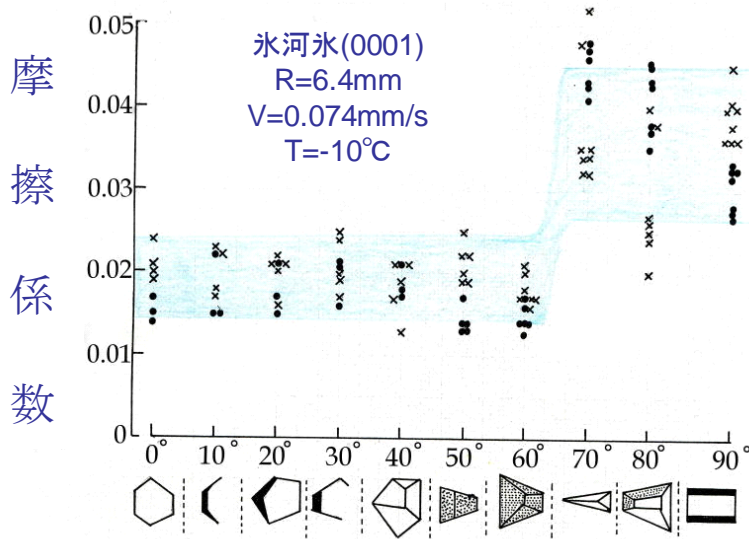


図 80 各種の氷結晶面による摩擦の異方性

図 79, 図 80 の結果は単結晶氷の摩擦から結晶面によって摩擦が異なることを示す重要な結果である。これらの結果は融け水の多少を滑りの良し悪しに結びつける摩擦融解・水潤滑説その他の学説では説明できない。

#### (8) 同一結晶面上の滑り方位による摩擦の異方性

図 81 は氷の柱面(10 $\bar{1}0$ )上で、滑り方位を変えて測定したときの摩擦曲線記録の一例である。氷試料は PMMA(アクリル)円板に凍着されており、360°の角度が目盛られた円筒状試料受けの中で回転できる。

測定は 10°毎に試料を回転して行われたが、図 81 には 30°毎の摩擦曲線が示されている。0°, 180°の方向で摩擦が最大、90°, 270°の方向で摩擦が最小となった。角度が増すにつれ、摩擦は徐々に変化している。摩擦曲線で注目されるのは、静止摩擦と動摩擦の違いが殆ど認められないことである。これは氷の上に滑走体を乗せて 2 分後という、短時間に摩擦を開始しているため、氷のクリープによる接触面の拡大が殆ど生じなかったからである。

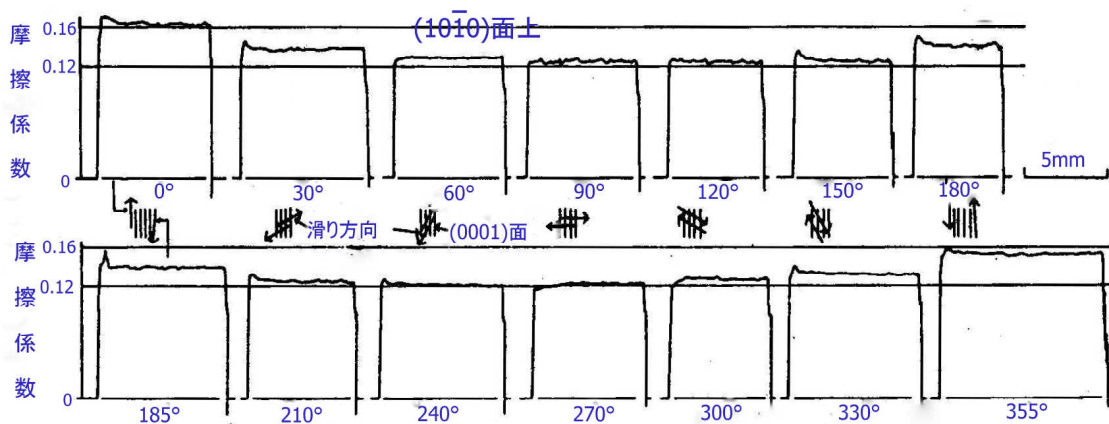


図 81 氷の(1010)面上の滑り方位による摩擦の異方性, 摩擦曲線

荷重: 6.9N, 速度:  $7.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ , 温度:  $-25^\circ\text{C}$ , 滑走体直径: 2.34mm, ↑: 滑り方向

測定は10°毎に試料を回転して行われたが、図 81 には30°毎の摩擦曲線が抜粋して示されている。0°、180°の方向で摩擦が最大、90°、270°の方向で摩擦が最小となった。角度が増すにつれ、摩擦は徐々に変化している。図 81 の摩擦曲線で注目されるのは、静止摩擦と動摩擦の違いが殆ど認められないことである。このような静摩擦と動摩擦の一致は図 80~図 87 の全ての測定で記録された。これは氷の上に滑走体に乗せて 2 分後という、短時間に摩擦を開始しているため、氷のクリープによって鋼球と氷接触面の拡大が殆ど生じなかったからである。

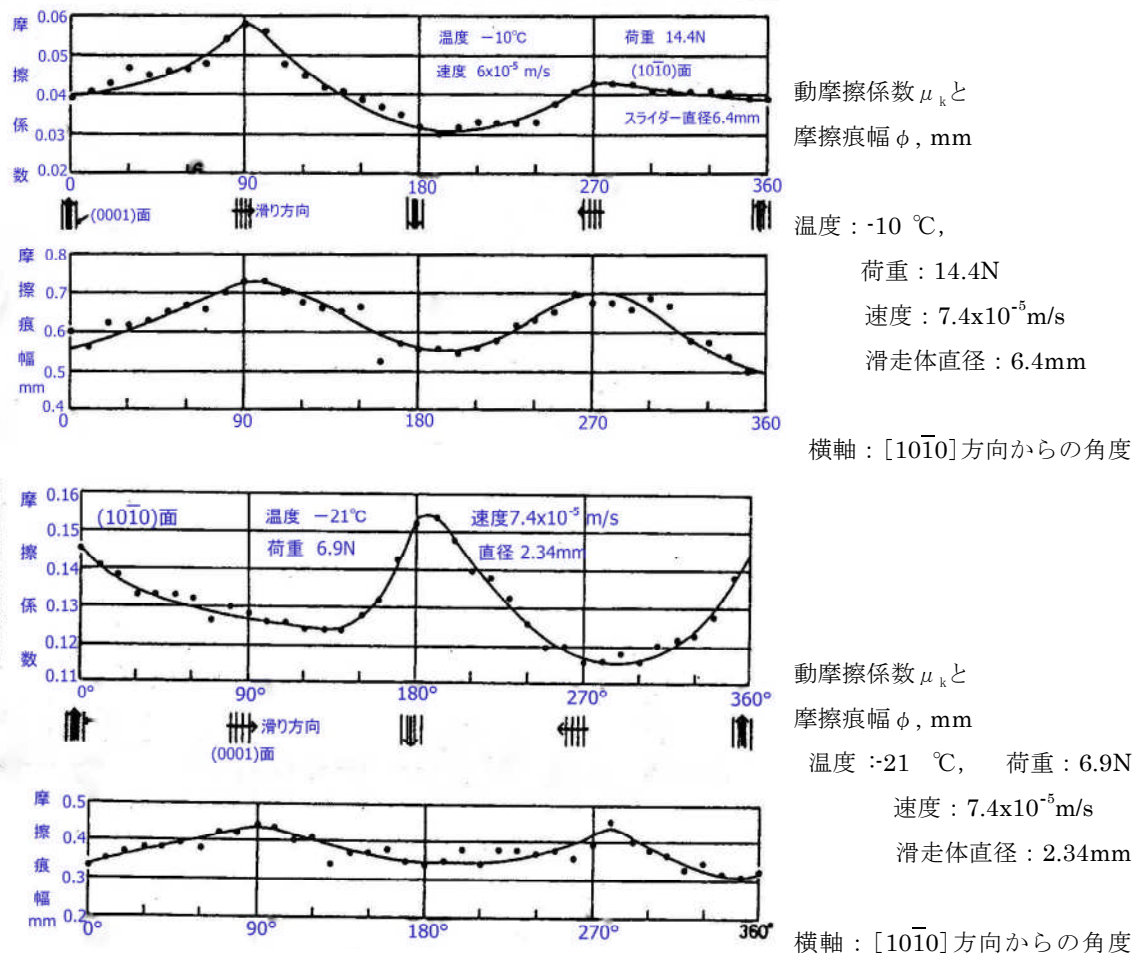
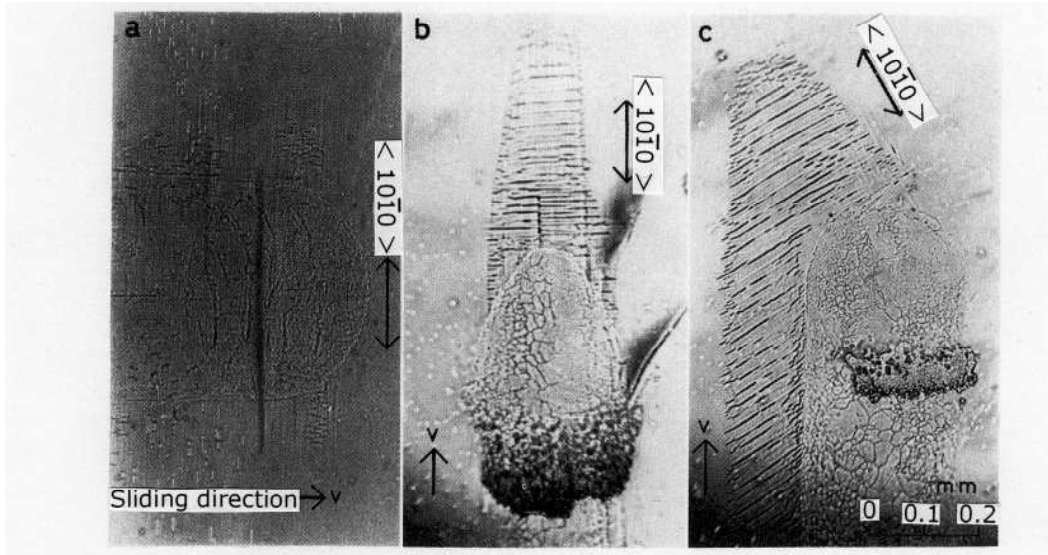


図 82 (10 $\bar{1}0$ )面上の摩擦係数と摩擦痕幅

図 82 には(10 $\bar{1}0$ )面上の摩擦について、摩擦係数、摩擦痕幅が滑り方向に対してプロットされている。温度の高い-10 °Cでは摩擦痕幅の狭いとき摩擦係数は小さく、摩擦痕幅が広いとき摩擦係数も大きかった。0°方向の滑りではスライダは氷の迂り面である底面(0001)に平行に滑るから、氷の塑性変形がスライダの前方に向かって発生し、摩擦痕幅は狭い。一方 90°方向の滑りは(0001)に直交する滑りであるから、摩擦痕幅を広げるように氷の塑性変形が発生し、摩擦痕幅が広い。しかし、温度が-21 °Cと低い場合には、摩擦痕幅と摩擦係数の最大、最小を示す角度が 90°ずれる結果となった。この場合でも摩擦痕幅の最大最小の方向は-10 °Cの場合と変わらない。変わったのは摩擦係数の最大最



小の位置である。90°の滑り方向では摩擦痕幅は最大なのに摩擦係数は最小となっている。この方向の滑りでは滑走体の前に図 83a に見られるように変形領域はない。しかし、摩擦痕幅最小、摩擦最大の0°の方向では図 83b に見られるように滑走体の前方に氷の変形領域が形成される。スライダーはこの変形領域を前進させる形で滑っていくために大きな抵抗が現れこの方向の滑り摩擦を最大にしたと解釈される。



滑走方向 a : (0001) b : (11 $\bar{2}$ 0) c : (0001)から30度  
 荷重 : 6.9N 速度 :  $7.4 \times 10^{-5}$  m/s 温度 : -20 °C 滑走体直径 : 2.34mm  
 図 83 -21 °Cでの(10 $\bar{1}$ 0)上の摩擦痕

温度の低い-21 °Cでの摩擦痕が図 83 に示されている。摩擦痕幅が狭く、摩擦が大きかった0°の方向(図 83b)では滑走体の前面に顕著な氷の盛り上がりが生じていた。一方、摩擦が小さく、摩擦痕幅の大きかった90°の方向(図 83a)では滑走体前面の氷は殆ど変形を受けていなかった。図 83c では氷の結晶学的向き面(0001)が滑走方向に対し30°傾いている。目されるのは向き線が摩擦痕の左側に形成され、滑りの後方に傾いていることである。単純に考えると滑りの前方に伸びるように形成されそうであるが図は逆になっている。結晶学的底面と60°傾いた方向に滑らせた場合に向き線が滑走の前方に伸びるように形成されるか興味を持たれる。

a) (11 $\bar{2}$ 0)面上での滑り方向による摩擦と摩擦痕の異方性

図 84 は氷の(11 $\bar{2}$ 0)面上に2.34mmのタングステンカーバイド球を滑らせたときの摩擦係数 $\mu_k$ (上)と摩擦痕 $\phi$ (下)の異方性が示されている。図 82 の-21 °Cに比べると(11 $\bar{2}$ 0)面上の摩擦のピークがよりシャープになっている。

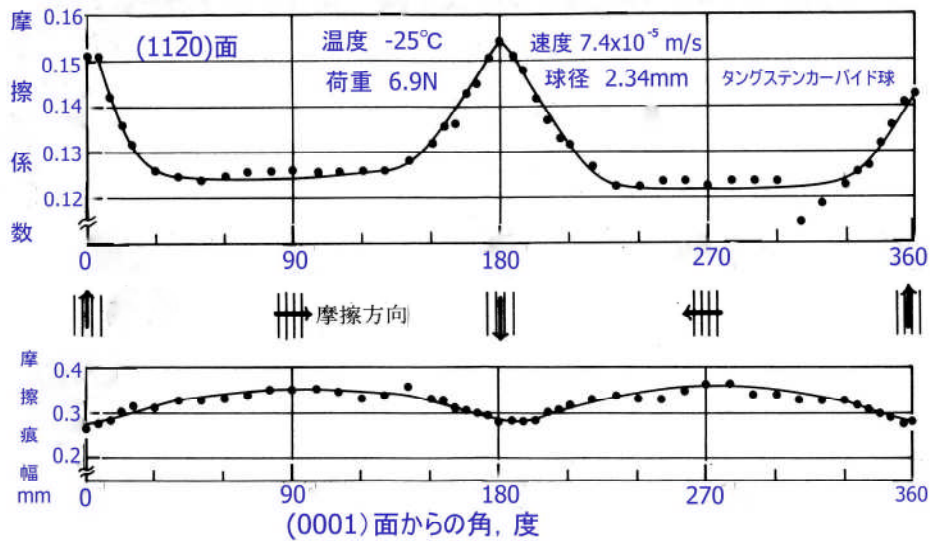


図 84 同一結晶面(11 $\bar{2}$ 0)上の摩擦係数と摩擦痕幅の異方性

荷重は 6.9N，速度  $7.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，温度は  $-25^\circ\text{C}$  であった。この場合も図 85 の  $-10^\circ\text{C}$  の場合と逆， $-21^\circ\text{C}$  と同じ異方性であり，底面(0001)に平行な滑りで摩擦が最大，摩擦痕幅  $\phi$  が最小となった。摩擦係数は 0.12 ~ 0.15 と大きく，掘り起こし抵抗の異方性が摩擦の異方性を支配している。掘り起こし断面積 ( $\phi^3/6R$ ) と掘り起こし抵抗はスライダ直径  $R$  に反比例し， $R$  の小さいもほど掘り起こし抵抗が大きくなる。図 84 の摩擦係数が 0.12~0.15 と大きいのはそのためであるが，滑り方向による摩擦の異方性は氷の塑性変形の異方性を反映したものといえる。

b) 結晶面が表面に対して傾斜した場合の滑り方位による異方性

図 85 では，試料の(0001)面が摩擦面に対して  $20^\circ$  の角度で交叉している。温度  $-19^\circ\text{C}$ ，荷重 16N，速度は上と同じ  $7.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，直径 6.4mm のタングステンカーバイド球を滑らせた。

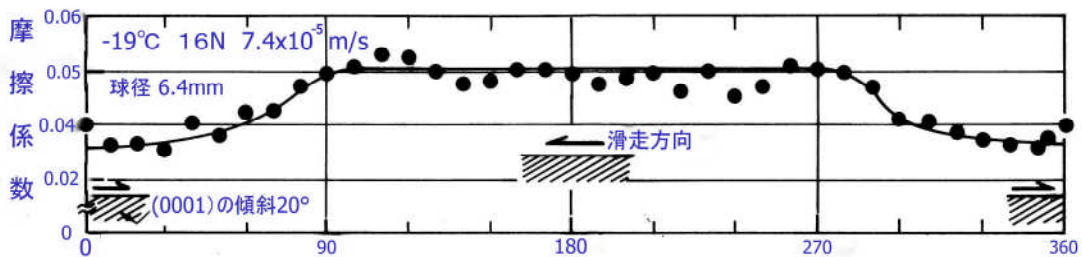


図 85 底面(0001)の傾斜角  $20^\circ$  の上の滑り方による摩擦の異方性

摩擦係数  $\mu_k$  は図の断面斜線[(0001)面]に対し順方向で 0.036 と小さく，逆なで方向で 1.4 倍大きい 0.050 の値を示した。

更に，滑り方位による顕著な摩擦の異方性が図 86 に示されている。

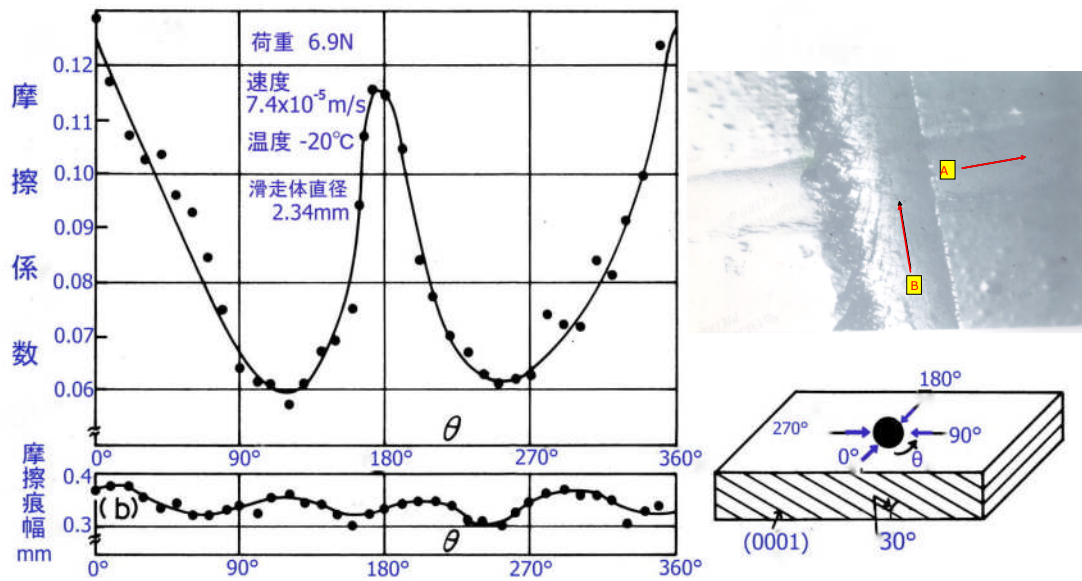


図 86 底面が 30 度傾斜した面上の摩擦と摩擦痕幅

荷重 6.9N, 速度  $7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , 温度  $-20^\circ \text{C}$ , 滑走体直径 2.34mm, タングステンカーバイド球。図の横軸の角度  $\theta$  は底面に平行な方向と滑走方向のなす角度を示す。

氷の結晶底面(0001)が摩擦面に 30 度で交叉している。 $\mu_k$ は(0001)面の稜に沿う方向で最大の 0.13, 直交する方向で最小の 0.06 であり, 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 $\mu_k$ の違いはほとんどなかった。摩擦痕幅も同図に見られるように多少の違いはあるが, 柱面上で認められたような $\mu_k$ との対応関係はない。

c) (0001)面上の摩擦

図 87 は温度 $-10^\circ \text{C}$ , 速度  $7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , 滑走体直径 6.4mm のタングステンカーバイド球, 荷重 10.5N, および 26.8N としたときの $\mu_k$ の大きさを滑り方位の関数として示している。縦の細い線は滑走中の摩擦の変動幅を示す。

荷重の小さい 10.5N の摩擦係数は 0.02, 荷重が 2.5 倍大きい 26.8N の摩擦係数は 3 倍大きい 0.06 であった。底面上の滑りでは  $60^\circ$  毎に同一方向が現れること, 結晶学的迂回面上の滑りであることから異方性が少ないことは予想される図 87 は予想通りといえる。

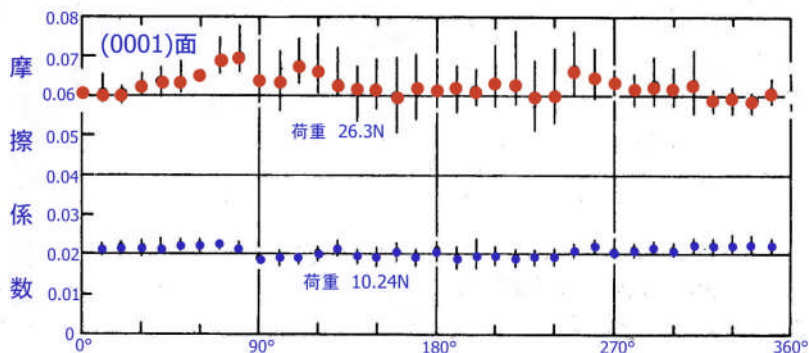


図 87 底面(0001)上の滑走方位による摩擦係数の測定(荷重 上: 27N, 下: 10N)

図 88 は氷試料の表面に残された摩擦痕を示す。摩擦痕は 10 度間隔に 36 個示されている。氷試料はアクリル円板に凍着されており、円板は摩擦装置の円筒状試料ホルダー内で自由に回転できる。

試料を 10 度ずつ回転させながら、摩擦を測定した。



図 88 結晶面上に刻まれた摩擦痕

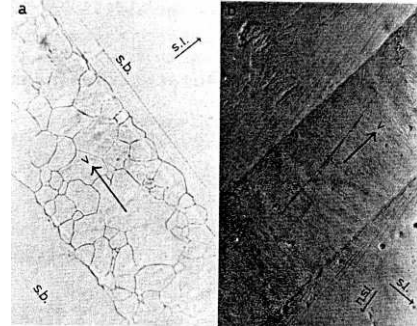


図 89 摩擦痕上に現れた再結晶，小傾角境界，迂り線

図 89a,b の写真は同一結晶面上で滑り方向が 90 度異なっている。V は滑り方向，図中 s,b は小傾角境界，s.l は底面すべり，n.s.l は非底面迂りを示す。a の摩擦痕上には再結晶粒が形成されており，b の摩擦痕上にはクラック [(0001) 面内に発生] が認められる。

### 9.3 凝着説の適用

ここでは図 70，表 11 に示した荷重効果の結果に凝着説を当てはめてみよう。この実験では圧力による融解は生じていない。摩擦による温度上昇  $\Delta T$  はイエーガー (Jaeger, 1942) によって与えられ

$$\Delta T = \mu_k WV / (4a) [1 / (k_1 + k_2)] \quad (34)$$

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， $\mu_k$  は動摩擦係数である。

式(34)は 3.4 節に述べた拡がり抵抗  $R = (1/4a \lambda_1) + (1/4a \lambda_2)$  を熱の流れに置きかえることによって簡単に導かれる。電圧を  $V$ ，電流を  $I$  とすると，オームの法則から  $V = IR$  なので， $I = (4a \lambda_1 + 4a \lambda_2) V$  となる。導電率  $\lambda$  を熱伝導率  $k$  におきかえると，電流  $I$  は熱流  $q$  に相当し，電圧  $V$  は温度差  $\Delta T$  に相当する。 $q = (4ak_1 + 4ak_2) \Delta T$ ，したがって， $\Delta T = (q/4a) [1 / (k_1 + k_2)]$

$q = \mu_k WV$  である。

今，最大の  $\Delta T$  を見積もるために  $\mu_k, W, V$  として本実験の最大値に近い値をとって計算してみよう。 $\mu_k = 0.02, W = 31\text{N}, V = 1.8 \times 10^{-3} \text{m/s}, a = 5 \times 10^{-4} \text{m}, k_1 = 2.2 \text{W/mK}, k_2 = 24.5 \text{W/mK}$  を用いると，

$$\Delta T = 0.02 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (35)$$

となる。実際の  $\mu_k, W, V$  はこの計算に用いた値より小さいのが常であるから， $\Delta T$  はここで求めた値より小さくなり，事実上無視して差し支えない。圧力による融点降下を考慮しても融解の可能性はなく，純粹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等の境界摩擦は凝着説で説明されているが，この説を粘弾性体である氷に適用するために通常のせん断項  $F_s$  の他に，掘り起こし項  $F_p$  および再結晶やク

ラックその他の変形を生じさせるための抵抗  $F_d$  を付け加える必要がある。

表 12 凝着説による摩擦係数の計算

$T = -10\text{ }^\circ\text{C}, V = 7.4 \times 10^{-5}\text{ m/s}, (10\bar{1}0)$  面

荷重 N	W kgf	せん断項 $\mu_s$	掘り起こし項 $\mu_p$	理論値／実験値 $(\mu_s + \mu_p) / \mu_{\text{meas}}$
1.4	0.144	0.008	0.008	0.8
2.9	0.295	0.007	0.010	0.9
3.9	0.395	0.009	0.016	1.2
5.4	0.545	0.009	0.018	1.2
7.9	0.795	0.007	0.016	0.9
10.4	1.045	0.009	0.027	1.0
16.0	1.600	0.009	0.032	1.0
22.0	2.200	0.011	0.050	1.1
31.0	3.100	0.011	0.059	1.0

つまり、摩擦抵抗  $F$  は

$$F = F_s + F_p + F_d \quad (36)$$

となる。摩擦痕の幅を  $\phi$ 、界面せん断強さを  $p^*$  とすると、

$$F_s = (1/4) \pi \phi^2 s, \quad F_p = (\phi^3 / 12R) p^* \quad (37)$$

と表される。せん断項および掘り起こし項の摩擦係数  $\mu_k$  への寄与を、 $\mu_s$ 、 $\mu_p$  とすると、

$$\mu_s = F_s / W, \quad \mu_p = F_p / W \quad (38)$$

$s$  および  $p^*$  の値として、1.1MPa、120MPa を用いて、 $\mu_s$ 、 $\mu_p$  を計算すると表 12 のようになる。

$\mu_s$  は全荷重範囲にわたって 0.009 のほぼ一定値を示し、 $\mu_p$  の方は 0.008 から 0.059 まで荷重の増大とともに大きくなっている。計算で求めた摩擦係数  $\mu_s + \mu_p$  と実測値との比は 0.8 ~ 1.2 の間にあり、ほとんど 1 である。このことは氷の異常に小さい摩擦もまた金属間の摩擦と同様に凝着説で説明できることを示すものであろう。金属と異なる点は、氷の硬さは金属に比べて余り小さくないのに、界面せん断強さが金属より極端に小さいことである。

#### 補足 A 単結晶氷の摩擦の実験装置

図 90 ~ 97 に第 8 章に述べた摩擦実験に用いた装置を示す。PMMA (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けを用いた。棒 L の中間に重さの異なる錘を吊すことにより、接触面の荷重を 0.44N から 31N まで変えた。

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

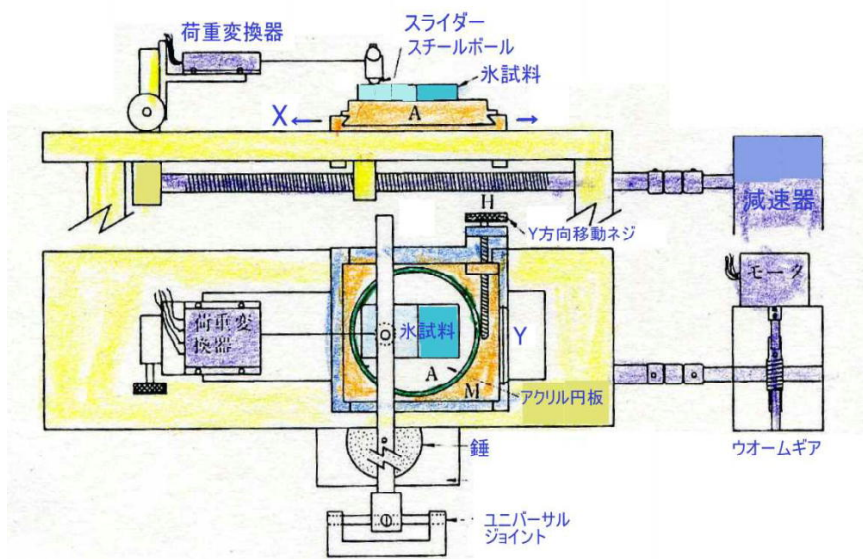


図 90 単結晶氷の摩擦実験装置

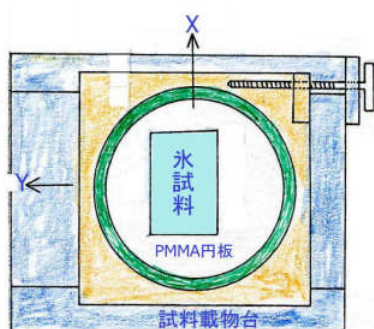


図 92 試料載物台

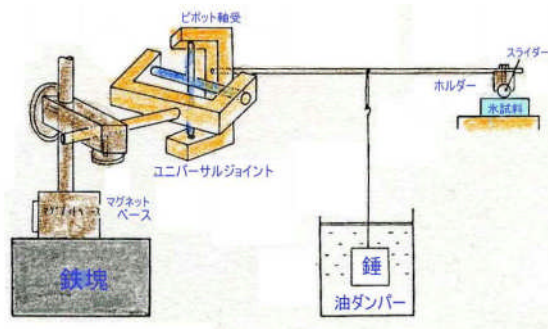


図 91 スライダー支持棒 L とユニバーサル・ジョイント

氷試料の凍着された PMMA 円板 A は真鍮の筒にはめ込まれているので、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。各測定が終わる毎に H を動かし、常に新しい氷の面で摩擦を行った。同期モーターと減速器(ウオーム歯車)とをいろいろに組み合わせることにより、摩擦速度を  $7.4\text{mm/s}$  から  $1.5 \times 10^{-4}\text{mm/s}$  の広範囲に渡って変えた。

錘を棒 L に吊すと、錘が振動し、摩擦変動の原因となることがあった。そのような場合は、錘の振動を留める目的で、錘を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に乗っていて、温度を自由に制御できる低温実験室におかれている。 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  から  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  の間の温度で行った。温度制御は  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内の精度であった。

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避けるため、コンクリートの床と実験台の間に 5mm 角のゴム板を挟み、また実験台の棚にも鉄の錘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影響を及ぼすのを防いだ。

氷の摩擦係数は 0.003 ~ 0.006 程度の小さな値も計測されている。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動いてしまう。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 度以内の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  $4 \times 10^{-4}$  度以内とした。

**試料載物台：** ハンドルを回すことで、滑走痕に対して氷試料が平行移動し、毎回、新しい氷面で摩擦することができる。PMMA の円板に氷試料が凍着されており、この円板は角度目盛を刻まれた真鍮の筒内に挿入される。筒内で 10 度毎に試料を回転しながら、氷の上にスライダを滑らせると同一結晶面上の滑り方位による摩擦の違いが測定される。

**氷表面の仕上げ：** 氷を貼り付けた PMMA 円板を内側から旋盤のチャックに挟み、氷の表面を旋盤用バイトで削った。この時、削り屑が長い帯状に剥離するように  $-5$  °C 程度の高い温度、低速回転の条件で削った。温度が低かったりバイトの切れが悪いと削り屑が粉状になって、きれいな仕上げ面が得られなかった。削った直後の氷試料を実験装置(多くの場合  $-10$  °C)に移し、試料の汚染を防ぐため大型のシャーレに入れて保存した。氷が冷える過程で、氷表面から昇華蒸発が進み、鏡面状に変わった。この昇華により、仕上げ中の傷も除去される効果があったと思われる。

**滑走体支持棒：** 滑走体のタングステンカーバイド球は真鍮ホルダーにはめ込んで支持した。このホルダーの上端はネジで支持棒に固定される。棒の端はユニバーサル・ジョイントに連結されていて、垂直軸の軸受けは摩擦の小さいピボットとした。ユニバーサル・ジョイントはマグネットスタンドにボルトで固定され、高さや角度を自由に調整出来る構造になっている。

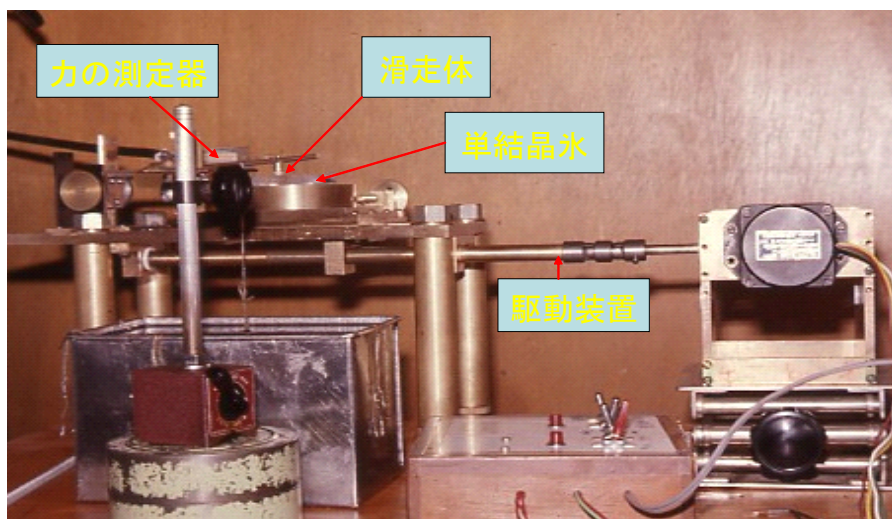


図 90 単結晶氷の摩擦の異方性測定に使用された実験装置

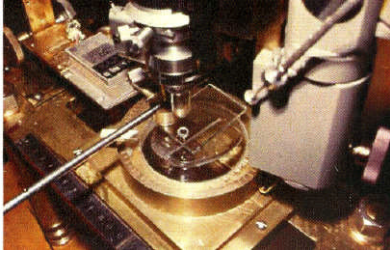


図 91 図 90 の装置に観察用顕微鏡を取り付け摩擦中の真の接触面を観察  
(半球状ガラスと水平板の摩擦)

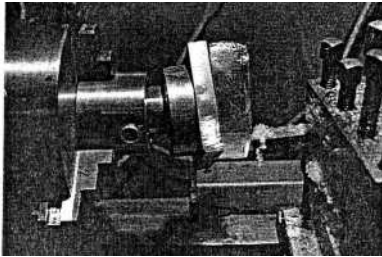


図 92 単結晶氷試料から結晶面の切りだし  
氷はユニバーサル台に凍着されている。低温室内の旋盤で氷表面を削る

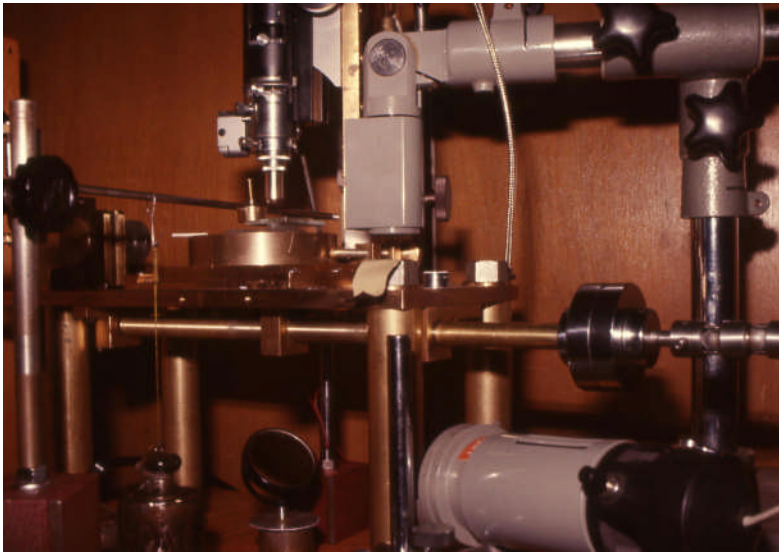


図 93 半球状氷滑走体試料(スライダ)ホルダー  
左端のホルダーは氷の結晶面を回転できる



減速器





摩擦装置



### 氷雪の摩擦に関する実験・研究の勘所

実験には洗練された注意力が必須である。実験を何度も何度も繰り返すことによって注意力は研ぎ澄まされ、洗練され実験技術が身についていく。注意力や実験技術が洗練されていく過程で氷雪に潜む性質を実感すれば、技術は一層研ぎ澄まされていく。実験過程で手を抜くことは禁物である。むしろ実験は再現されないという程の緊張感をもって遂行すべきであろう。

氷雪は硬いとはいえ、金属やプラスチック同士の摩擦に比べれば軟らかく、かつ氷の弾性変形は少なく塑性変形が主となり、滑走痕も明瞭に残ることが多いという利点がある。このような氷雪の特徴に着目すれば、球面スライダーと平滑面の摩擦というように試験方法を工夫することで真の接触面積を見積もることが容易になる。摩擦は真の接触面で起こるのだが、多くの実験・研究では真の接触面積をブラックボックスとして結果の解釈が行われてきた。そのような曖昧さを排除して定量的計測を進め、摩擦機構などを定量的データに基づいて議論を進めることが、摩擦機構の議論上の混沌を克服する勘所となる。

氷・雪の表面は傷つきやすい。カンナ、マイクローム、旋盤等で削った氷表面はスライダー表面以外触れさせないことは表面を扱う上での常識である。また、呼気による表面の汚染、手や手袋から発生する湿気なども表面汚染の原因となるから息などが氷面に届かないように注意しなければならない。同様にスライダー・滑走面に対する注意も必要である。ガラススライダーの使用から判ることだが、氷とスライダーの間に僅かな温度差、氷に対しスライダー表面温度が僅かに低いだけでもスライダー表面に着霜し摩擦を大きくする。

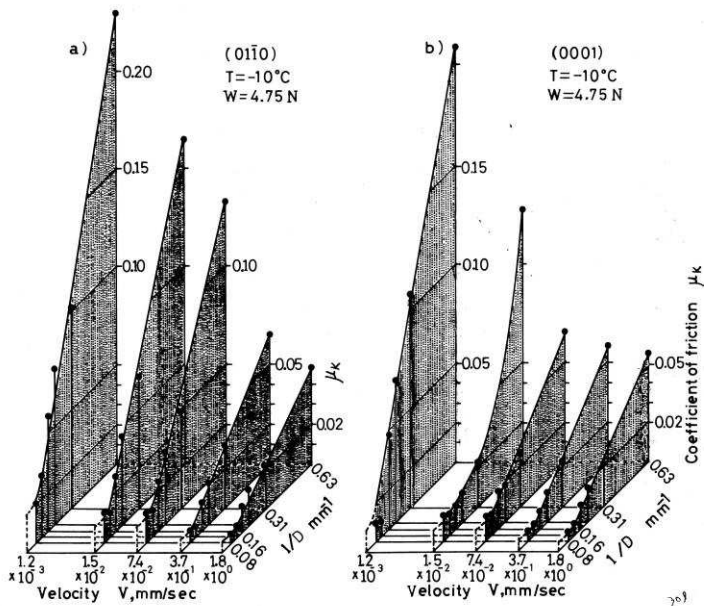
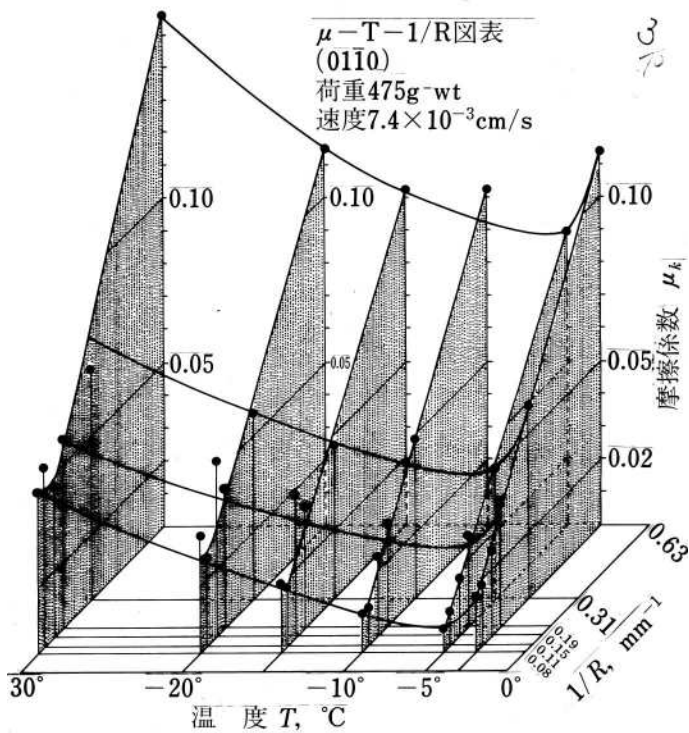


图 上： $\mu - T - 1/R$  图表 ( $10\bar{1}0$ ) 面， $W=4.7\text{N}$ ， $V=7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$   
下： $\mu - V - 1/R$  图表 ( $T=-10^\circ\text{C}$ ， $W=4.7\text{N}$ ，左  $10\bar{1}0$  面，右  $0001$  面)

## 10. 氷の硬さと掘り起こし強さ

氷の硬さ、つまり、氷が物を支える能力は摩擦過程における真の接触面積を見積もる上で重要である。

氷の硬さについていくつかの測定結果が示されているが、最もよく引用されるのは剛体球を一定荷重 $W$ で氷の表面に押し付けたとき、氷の表面に作られる永久窪みの面積 $A$ を測定し、単位面積当たりの荷重 $W/A$ で硬さを表示するブリネル硬さ $H$ である。

押し込み球の直径 $D$ 、永久窪みの直径を $d$ とすると、ブリネル硬さ $H$ は

$$H = \frac{2W}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]} \quad (39)$$

で表される。

バトコビッチ (Butkovich, 1954) の測定結果が図 98 に示されている。主に使用された剛球の直径は 6.4mm (=1/4 インチ)、荷重は 1kgf であった。氷は粘弾性体なのでブリネル硬さ $H$ は荷重を加えている時間 (荷重時間) と温度によって著しく異なった値を示す。一方、バーズらは直径 40mm ほどの大きな鋼球と 100kgf の大きな荷重を用いて氷の硬さを測っているがその値は表 14 に見られるようになりに小さい。圧子の大きさも硬さの値に影響を与える。平面と球面、平面同士など摩擦面の組み合わせ表面仕上げの状態によって適用する硬さを選択するのがよい。

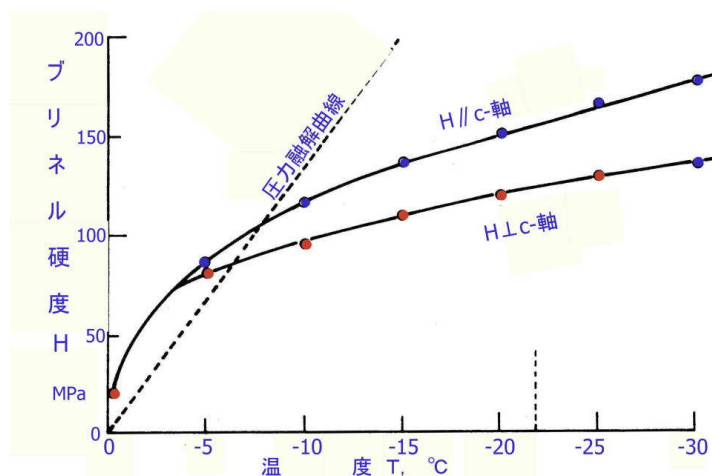


図 98 氷のブリネル硬さ

図中の破線は氷の圧力融解曲線である。融点に大変近い温度領域で硬さが破線の上でている領域がある。この領域では圧力融解が発生している。

バトコビッチは単結晶氷の底面(0001)と柱面(10 $\bar{1}$ 0)面についての硬さを報告しているが、結晶面による硬さの大小が温度によって逆転することが注目されている。

表 14 には 8.2 節に述べた摩擦実験から得られた硬さ、バトコビッチのブリネル硬さ、バウデン・テーバーの硬さの値が示されている。

氷の硬さは氷の塑性変形の圧力と考えてもよい。滑走体が氷に傷を付ける (氷に溝を掘っていく) とき氷に塑性変形を行わせる圧力  $P$  は、およそそのところ上のブリネル硬さ  $H$  に等しいと考えてよい。

表 14 氷のブリネル硬さの測定結果 単位：MPa (= 10kgf/cm<sup>2</sup>)

温度 °C	対馬	Butkovich (Brinell) 1	Barnes and Tabor	Bowden and Tabor
-0.25				18
-1	6.4			
-2			30	
-3	18.5			
-4		60		
-5	34.5		45	34
-10	74.5	118	60	
-15	107	135		
-20	130	150	90	60
-30	238	174		

表 13 ブリネル硬さ

材料	MPa
鉄	1000
銅	250
鉛	40
インジウム	10

1:押し込み時間 1 秒の硬さ

筆者が 8.2 節に述べた摩擦実験から得た単結晶氷の掘り起こし強さの値を表 15 に示す。実験の際の摩擦速度は  $7.4 \times 10^{-5}$  m/s, 荷重は 2.7 ~ 4.75N であった。

掘り起こしの強さ P は温度が低くなるほど大きくなり、結晶面によっても異なることがわかる。後で述べるように P の値は塑性変形の圧力なので温度と滑り速度によって変化する。摩擦測定から決められる P の値は同一結晶面上でも滑り方位によって異なるはずである。底面上では滑り方位が 60° 変わる毎に同一条件になり、異方性は小さいと予想されるが、柱面上の滑りでは氷の結晶学的すべり面である (0001) 面表面に垂直に位置しているから結晶学的すべり面に垂直か平行かまたすべり面からの角度によって P の体が変わりと期待される。表 15 ではそのような異方性を考慮していない。

表 15 氷の掘り起こし強さ 単位：MPa (= 10kgf/cm<sup>2</sup>)

温度, °C	-1	-3	-5	-10	-15	-20	-30
底面 (0001)	5.6	19	37	70	129	146	183
柱面 (10 $\bar{1}0$ )	7.1	18	32	79	84	113	292

遅い速度の摩擦では塑性変形によって氷に刻まれる溝が顕著になる。塑性変形によって氷に単位の断面積の溝を掘っていく抵抗、つまり、掘り起こし強さは掘り起こす速度によって異なることになる。

直径 6.4mm のタングステンカーバイド球を滑走体とし、温度 -10 °C, 荷重 4.75N で単結晶氷（底面および柱面）の上に滑らせたときの掘り起こし強さ P\*（氷に単位の溝を掘る抵抗）の速度依存性は次の表 16 に示すようになった。

表 16 から掘り起こし強さ P\*は速度が  $7.4 \times 10^{-5}$  m/s より速い領域では一定になっているのがわかる。P\*は速度  $7.4 \times 10^{-5}$  m/s より遅い領域で急激に小さくなっている。

表 16 掘り起こし強さ P\* の速度依存性

速度 V, m/s	P*(0001), MPa	P*(10 $\bar{1}$ 0), MPa
$1.8 \times 10^{-3}$	76	87
$3.7 \times 10^{-4}$	79	79
$7.4 \times 10^{-5}$	70	77
$1.5 \times 10^{-5}$	47	61
$1.2 \times 10^{-6}$	19	22

ただし、せん断強さを  $s_b = 0.34\text{MPa}$ ,  $s_p = 0.55\text{MPa}$  とした

なお、底面(0001)上の掘り起こし強さは滑走方向によって変化しないが、柱面(10 $\bar{1}$ 0)上の掘り起こし強さは滑走方向(結晶方位)によって著しく変わる。氷の柱面上の摩擦では滑る方向によって塑性変形で流動する氷との関係が変わるため、滑る前方に塑性変形が発生する(つまり、c軸<0001>の方向に平行に滑る)場合は抵抗が大きく(最大)なり、滑る方向と直角に塑性変形が発生する場合(つまり、c軸<0001>に直角に滑る)は掘り起こしの抵抗が小さく(最小)なる。同一結晶面上で滑る方向を変えたときの掘り起こし抵抗の値も詳しく調べられている。

### 11. 氷のせん断強さと付着強さ

氷のせん断強さと付着強さは氷の硬さとともに摩擦に深く関与している。摩擦面の付着が強ければせん断破壊は氷の内部で発生し、摩擦面のせん断強さは氷のせん断強さに等しくなる。

一方、摩擦面の付着強さが氷のせん断強さより小さい場合は、せん断は界面で行われ、その値は付着強さに等しくなる。氷の付着強さは物質によって異なり、同じ物質でも温度によって変化することが知られている。

表 17 氷のせん断強さ 単位: MPa (= 10kgf/cm<sup>2</sup>)

温度 °C	対馬 MPa	Jellinek MPa	Raraty and Tabor	Butkovich (1954)	Bowden and Tabor
-1	0.09				
-2		0.2			
-3	0.14				
-5	0.26	0.5	0.8	1.37	1.8
-10	0.45	1.2	1.6	1.55	3.5
-15	0.86	1.5			
-20	1.8		3.1		9.0
-30	4.1		5.1	2.17	15.0

筆者が 8.2 節に述べた摩擦実験から得た単結晶氷の界面せん断強さを表 18 に示す。実験の際の摩擦速度は  $7.4 \times 10^{-5}\text{m/s}$ , 荷重は 2.7 ~ 4.75N であった。

表 18 氷とタングステンカーバイド球の界面せん断強さ 単位：MPa

温 度 °C	-1	-3	-5	-10	-15	-20	-30
底面 (0001)	0.05	0.12	0.17	0.34	0.62	1.2	3.4
柱面 (10 $\bar{1}0$ )	0.12	0.15	0.35	0.55	1.09	2.4	4.8

せん断強さの値は温度が低くなると著しく大きくなり、およそ 5 °C 下がる毎に倍に増大している。測定された全温度範囲で底面は柱面より小さなせん断強さを示していることも注目される。せん断強さの値は摩擦速度（せん断速度）にあまり依存しない。

表 19 氷のせん断付着強さの測定結果

Jellinek (1970) の氷の付着に関するレビューによると、氷の各種物質に対する付着強さの測定は多くの研究者により報告されていて、代表的なものとして Sallario (1933, トルク法), Hunsacker et al (1940), Loughborough (1946, 遠心力法), Raraty and Tabor (1958), Ford and Nichols (1951, 62), Bascom et al (1969), Brunner (1952), Jellinek (1957, 1958, 1962, 1970), Landy and Freiburger (1967) などがある。これらの結果を以下に示す。

物 質	Loughborough	Sallario	Brunner, 単位：MPa		
銅	0.87MPa	2.24MPa	金属 0.95	ポリスチレン	0.59
鉄	1.30	2.66	金属酸化面 0.88	パラフィン	0.46
アルミニウム	1.55	2.47	スキーラッカー 0.62	シリコングリース	0.31

Landy and Freiburger (1967), 温度：-12 °C, 単位：MPa (= 10kgf/cm<sup>2</sup>)

物 質	接触角	せん断強さ	物 質	接触角	せん断強さ
テフロン FEP	110 °	0.18	ポリビニルピロリドン	82 °	0.56
テフロン PTFE	108	0.32	アクリル PMMA	80	0.64
ポリエチレン PE	94	0.26	ポリヘキサメチレン	70	0.30
ポリクロロトリフルオロエチレン	90	0.31	アデイン		

表面粗さと付着強さ, -4.5 °C (Jellinek, 1960)

表面仕上げ	せん断速度, m/s	せん断強さ, MPa
ステンレス旋盤仕上げ	$5.9 \times 10^{-5}$	0.61
ステンレスマット仕上げ	$5.4 \times 10^{-5}$	0.27
ステンレス鏡面仕上げ	$5.8 \times 10^{-5}$	0.06
水晶オプティカルフラット	$6.3 \times 10^{-5}$	0.02

氷の試料には厚さ 12mm, 密度  $890\text{kg/m}^3$  のゆき氷が使用された。

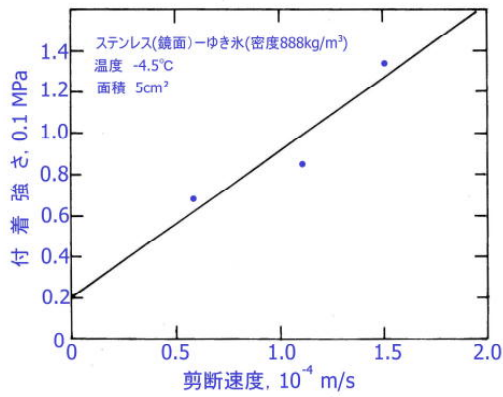
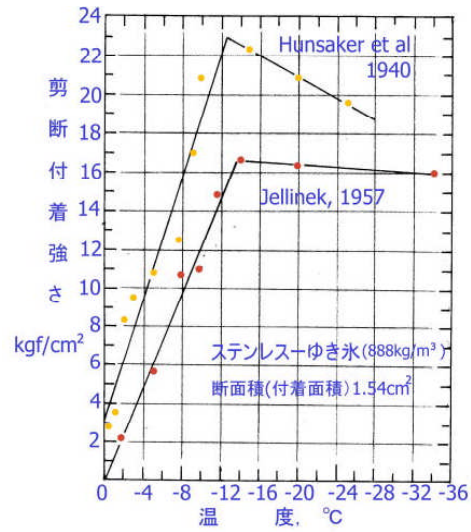


図 99 Jellinek の実験 (SIPRE Spec.Rept. 115, 1970)



## 1 2. プラスチック球面と水平板の摩擦

8 節のタングステンカーバイド球と単結晶氷との摩擦を各種プラスチック球について調べた。実験結果はプラスチック球の大きさ, 荷重, 速度, 温度によって複雑に変化した。結果を図 100, 101, 102 に示す。

これらの図は直径 6.4mm の球面を氷の (0001) 面に滑られせものである。図 100 では PMMA (アクリル) を除くと, 荷重  $0.45\text{N} \sim 25\text{N}$  に対して摩擦係数は荷重に関係なくほぼ一定で, 多くが動摩擦係数  $0.03 \sim 0.1$  でタングステンカーバイドの場合より大きな摩擦を示した。

図 101 は摩擦係数に及ぼす速度効果を示した。速度が  $10^{-3}\text{mm/s}$  から  $1.8\text{mm/s}$  に増大するにつれ著しく減少する結果を示した。PE (ポリエチレン), PTFE (ポリテトラフルオロエチレン, テフロン), POM (デルリン) は  $10^{-2}\text{mm/s}$  以下の速度で著しく大きな動摩擦を示した。

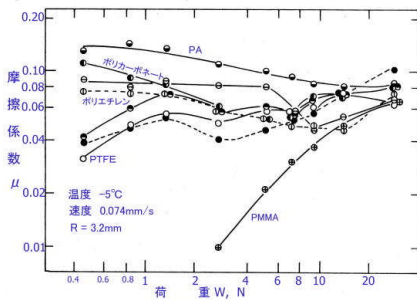


図 100 荷重効果

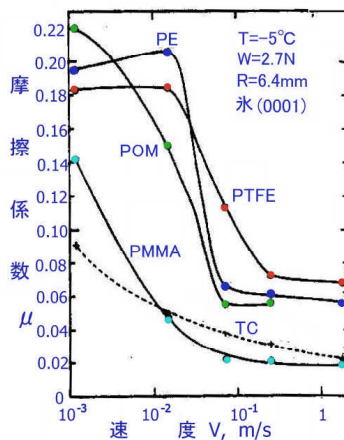


図 101 速度効果

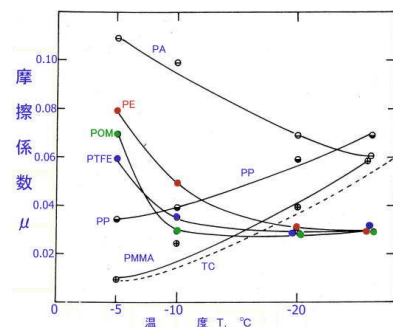


図 102 温度効果

図 102 に温度を  $-5 \sim -25\text{ }^\circ\text{C}$  に変えた時の動摩擦係数の変化を示した。材質の軟らかい

PA (ポリアミド, ナイロン), PE (ポリエチレン), PTFE (テフロン), POM (デルリン) は温度の低下と共に摩擦が減少し, PP (ポリプロピレン), PMMA (ポリメチルメタアクリレート, アクリル) では温度の低下と共に摩擦が増大した。

表 20 には  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  と  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  における見かけの剪断強さの値を示した。荷重  $2.7\text{N}$ , 速度  $7.4 \times 10^{-2}\text{ mm/s}$ , 球径  $6.4\text{mm}$  とし, 氷 (0001) 面上に滑らせた動摩擦から求めた値である。PP, PMMA, PS (ポリスチレン) では低温で界面剪断強さが著しく増大したが, PE, PTFE, PC (ポリカーボネート) では温度が低下すると剪断強さが著しく減少した。POM, PA は温度による変化が小さかった。表には TC はタングステンカーバイドの値も加えている。 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  では TC は最も小さい値であるが,  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  では PA 程度の大きな値になっている。

表 20 高温と低温における氷とプラスチック球間の見かけの界面剪断強さ, MPa

温度	POM	PE	PTFE	PA	PP	PMMA	PC	PS	TC
$-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.47	2.4	2.3	2.1	1.4	0.5	7.1	5.1	0.4
$-26\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.60	0.8	0.9	2.8	4.6	4.8	3.2	10.3	2.0

表 20 から界面剪断強さ (付着強さ) は  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  では氷の剪断強さ程度またはそれより大きく, 低速ではプラスチック材と氷との界面は強く付着していると言える。 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  では POM, PE, PTFE のような低付着剤の界面剪断強さは氷の剪断強さより幾分小さな値であるが, 他のプラスチック材の界面剪断強さは大きな値となっている。

以上のプラスチック材料による付着強さの違いは氷に残された摩擦痕の観察により良く理解できる。

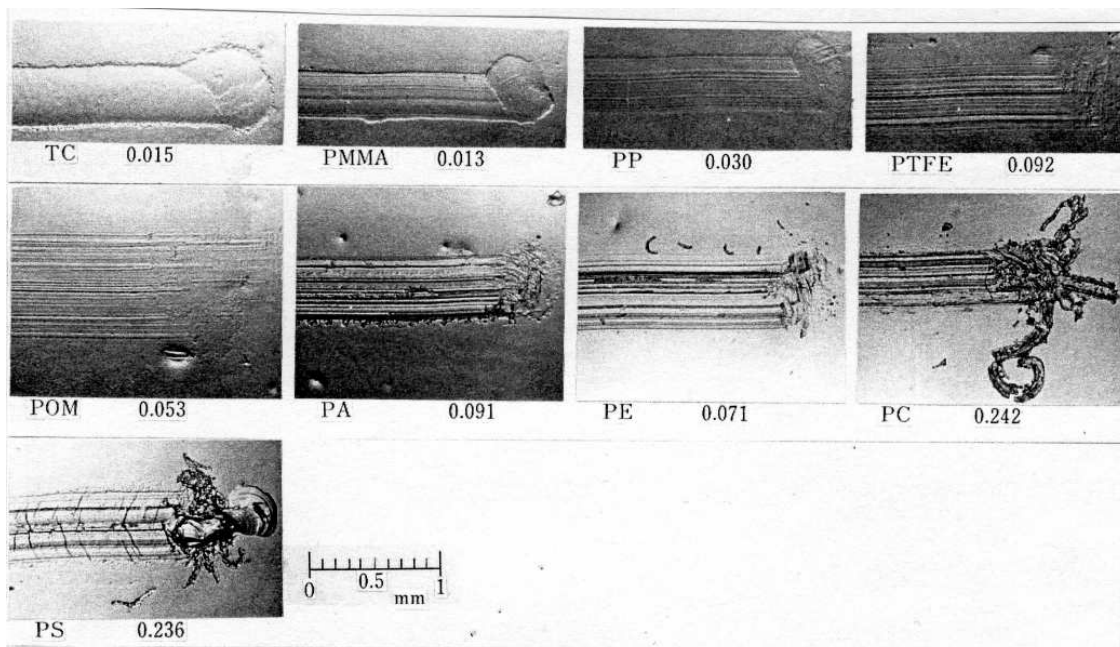


図 103 氷に刻まれた摩擦痕

温度:  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 荷重:  $4.75\text{N}$ , 速度:  $7.4 \times 10^{-2}\text{ mm/s}$ , 球径:  $6.4\text{mm}$ , 氷: (0001)





図 103 から摩擦係数が 0.236 と極めて大きい PS(ポリスチレン)では大きな付着のため、筋状の摩耗痕の他にクラックが発生している。クラックは非常に大きな歪みが氷に加えられたことを想像させる。摩擦係数が 0.242 と極めて大きかった PC(ポリカーボネート)では氷に顕著な引っ掻き傷が発生しており、スライダの先端には大量の摩耗粉が認められる。これらが大きな摩擦をもたらしたことがわかる。摩擦係数が 0.05 ~ 0.09 の中程度の値を示した PE(ポリエチレン), POM(デルリン), PTFE(テフロン)では広い摩擦痕が認められる。特にデルリンの摩擦痕が広く、これらが氷に比べ軟らかい材質であることを示している。これらでは広い摩擦痕が幾本もの筋状の摩擦痕から形成されていて摩擦を大きくしている様子が伺える。PE では摩擦痕の外側に摩耗粉も認められる。一方、摩擦係数の最も小さい PMMA(アクリル), TC(タングステンカーバイド)は摩擦痕の輪郭が認められるだけで、筋状の摩耗痕や摩耗粉が認められない。このように氷に刻まれた傷の小さいことが摩擦を小さくしている。

ここに示した摩擦痕は速度を速くすると変わり、温度を-26 °Cに低くしたものでも変わった。

### 1 3. 摩擦が最小となる温度について

図 74 の温度効果で示されたように温度を低温から高温へ変えていくと摩擦の極小が現れる。摩擦極小の温度は氷の底面と柱面で異なったが、速度を変えたときの摩擦極小となる温度を示す。

表 21 摩擦が最小となる温度

速度 V, m/s	$\mu_k(0001)$	°C	$\mu_k(10\bar{1}0)$	°C
$1.8 \times 10^{-3}$	0.005	-13	0.009	-8
$3.7 \times 10^{-4}$	0.011	-11	0.005	-7
$7.4 \times 10^{-5}$	0.011	-8	0.019	-7
$1.5 \times 10^{-5}$	0.015	-6	0.035	-4
$1.2 \times 10^{-6}$	0.010	-2.7	0.036	-1.8

滑走体の直径を 6.4mm, 加える荷重を 4.75N として, TC 球を氷の底面と柱面上に滑らせた。結果を表 20 に示す。

表 21 の結果は速度が速くなるほど摩擦最小の温度は低温側に移動することを示している。

スケート競技ではスケートリンクの氷をいかに滑りやすい状態に管理するかが問題となる。そこには氷を作る水の問題(純度や含有化学成分), 凍らせ方(氷の結晶粒の大きさや配置, 構造), 水に溶けている気体成分の処理の問題, そして滑りに最も関係の深い温度管理の問題がある。

1972 年に開催された札幌冬季オリンピックではそれに先立つスケートの滑りの基礎研究の成果をもとに $-2^{\circ}\text{C}$ が最適温度として提唱された。しかし, その後, 1988 年に室内スピードスケートリンクが登場し, 氷温コントロールが可能になってからは, オリンピック競技での氷温が $-5 \sim -7^{\circ}\text{C}$ 程度の低い温度に管理されてきた。1998 年日本で 2 度目の冬季オリンピックが開催されたが, 札幌オリンピックとその後の氷質の管理の食い違いを科学的に解明し, 科学に基づいた氷質や温度管理が行われることが課題であった。しかし, 長野オリンピックではスケートリンクの温度は $-3 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 程度に調整されたようである。欧米の選手に比べ体力の劣る日本選手はどちらかというところ軟らかい氷を好むということであろうか。その後, 新記録続出となったソルトレーク・オリンピックでは $-8^{\circ}\text{C}$ と低温であった。この最適氷温の違いは何によるのか。長野に比べカルガリーやソルトレークが標高 1060m, 1400m と高地(滑走に対する空気抵抗が小さい)のリンクであるという違いによるのか, 小林のデータの整理法に起因するのか問題を残している。

#### 1 4. 摩擦融解・水潤滑説の発展

##### 14.1 摩擦融解・水潤滑説を支持するイギリス・ヨーロッパ学派

イギリスは近代摩擦学発祥の地であり, ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所は摩擦学の体系を築くとともに, 世界の摩擦学をリードしてきた。

氷上のスケートの滑りについて, 最初の摩擦説=「圧力融解・水潤滑説」を提唱した Joly (1886) はイギリス人であったし, その後, 1889 年に同じ圧力融解説を繰り返したレイノルズ(Reynolds) もイギリスの科学者であった。この圧力融解説は氷の摩擦機構として半世紀以上君臨した。今日最も確からしいとされている「摩擦融解・水潤滑説」はバウデンとヒューズ(Bowden and Hughes, 1939) の実験的事実をもとに, イギリスのケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所から発表された。バウデンはその後も氷の付着や, テフロンスキーの試作・試験などを通して「摩擦融解・水潤滑説」を補強した。バウデン教授の協力者で後継者となったテーバー(Tabor) も摩擦融解・水潤滑説を支持する実験的研究を進めた。

バーネス・テーバー・ワルカー(1971) はバーネスが 1968 年に使った装置を用いて, 氷のクリープによる滑り領域を円錐状氷と平板との摩擦で調べた。エバンスら(1976) は図 108 の装置を用い, 水平軸の周りに高速で回転する氷円柱の上にハの字型に組んだスケートを滑らせて,  $1 \sim 10\text{m/s}$  の速度領域の摩擦の関係を実験的に調べるとともに, 熱解析を行って摩擦融解・水潤滑説を理論面で発展させた。その後, エーコックら(1981) は氷のリングの上を高速で回転するスライダーの摩擦を調べるとともに, エバンスらの熱

解析理論を発展させた。

摩擦面に発生する水膜の検出や厚さの決定は摩擦融説提唱以来の課題であったが、1981年遂にオーストリアのアンバッハとメイヨーが氷と水で誘電率が30倍も異なることに注目して、高速で滑走するスキー底面に発生する水膜厚さを電氣的計測によって決定した。

バーネス・テーバー・ワルカー (Barnes, Tabor, Walker, 1971) はバーネス (1968) の装置を用いて氷と平板の摩擦を行った。320 ~ 1200N (32 ~ 120kgf) の高荷重を用い、 $10^{-8}$  ~  $10^{-1}$  m/s の広範囲の低速度領域を調べた。氷の先端は頂角  $170^\circ$  の円錐型で、荷重を加えて数回摩擦すると先端がつぶれて直径 5 ~ 10mm の平面が現れた。この見かけの接触面積を  $36\text{mm}^2$  および  $100\text{mm}^2$  としたときガラス面に対する摩擦の測定結果が図 105 である。荷重は同じであるが動摩擦係数  $\mu_k$  は接触面積の大きい方が大きかった。

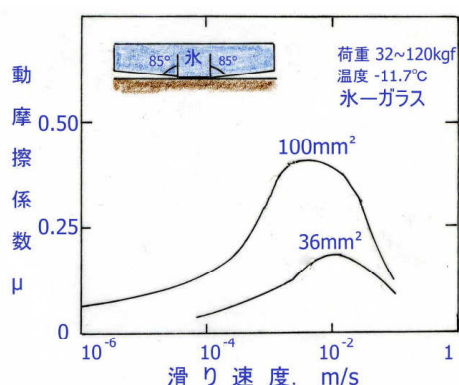


図 105 ガラスと氷の摩擦に及ぼす見かけの接触面積の効果

氷の接触面積を  $100\text{mm}^2$  としたときのグラニット、真鍮、ステンレス、ガラスに対する摩擦の測定結果が図 106 に示されている。ステンレスでは速度に関係なく摩擦係数 0.05 程度の小さな値を示しているが、グラニット (表面粗さ  $1.5\mu\text{m}$ ) では  $10^{-6}$  ~  $10^{-3}$  m/s で摩擦係数も 0.8 程度と大きく、付着-滑り (Stick-Slip) 現象を示した。これより速度の速い領域 ( $10^{-3}$  ~  $10^{-1}$  m/s) では速度の増大とともに摩擦は減少した。 $10^{-6}$  ~  $10^{-8}$  m/s の低速度領域では速度の減少とともに摩擦は減少した。真鍮 (表面粗さ  $0.2\mu\text{m}$ ) では速度が  $10^{-4}$  m/s 以上で付着-滑り現象が現れた。しかし、ガラス (表面粗さ  $0.1\mu\text{m}$ ) とステンレス (表面粗さ  $0.5\mu\text{m}$ ) では付着-滑り現象は観察されなかった。

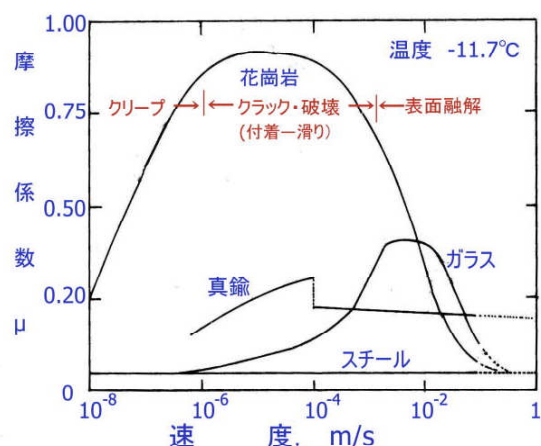


図 106 各種摩擦材料に対する氷の摩擦

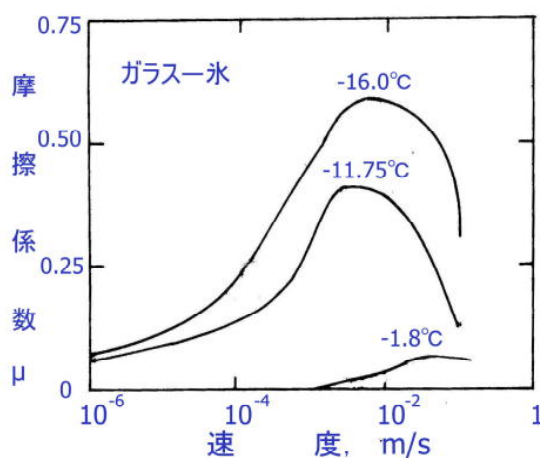


図 107 温度効果

摩擦面の温度上昇  $\Delta T$  は荷重  $W$ ，速度  $V$ ，摩擦係数  $\mu$ ，氷の接触面の直径  $2a$ ，氷と摩擦材の熱伝導率を  $k_1$ ， $k_2$  とすると，

$$\Delta T = \frac{\mu W V}{4a} \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (40)$$

で示される。

グラニット，ガラス，氷，真鍮の熱伝導率はそれぞれ 1，1，2.2，100W/(m·K)なのでグラニットとガラスに対しては  $1/(k_1 + k_2)$  の値は 0.3 になり，真鍮に対しては 30 分の 1 の 0.01 になる。 $W = 320\text{N}$ ， $V = 10^{-2}\text{m/s}$ ， $\mu = 0.3$  とすると，

$$\begin{aligned} \Delta T &= 15\text{ }^\circ\text{C} && \text{グラニット，ガラスの場合} \\ &= 0.5\text{ }^\circ\text{C} && \text{真鍮の場合} \end{aligned} \quad (41)$$

となり，高速で摩擦の減少する図 106 の CD の領域は摩擦熱による表面温度の上昇によるものとした。BC では固体摩擦の特徴の一つであるスティック・スリップ（付着・滑り）現象が観察された。AB 領域では速度の遅いほど摩擦は小さくなるが，これはクリープによる摩擦とした。

（著者注：バーネス等の実験ではステンレスが全速度域で速度に依存しない最低の摩擦を示した。この理由を著者等は単に氷との付着が小さいためと片付けている。しかし，氷が粘弾性体であり，接触面積が低速では増大すること，試験片の突起が氷に食い込み，氷に傷を付ける抵抗は速度が遅くなるほど小さくなることなどを考慮すべきであろう。したがって，バーネスらによって示された解釈以外にも説明の可能性のあることを注意すべきである）

エバンス・ナイー・チースマン (Evans, Nye, Cheeseman, 1976) は水平軸の周りに回転する氷の円柱の上にハの字型に組んだスケートを乗せ，速度と温度を変えて摩擦を調べた。スケートの断面は円形で氷円柱の表面に刻まれた V 字型の溝に沿って滑った。

実験装置は図 108 に示すように振子の形をしており，滑走体は氷との摩擦面だけで支持される点が特にユニークで優れている。

氷ドラムの半径は 54mm，氷表面に刻まれた溝の角度は  $90^\circ$ ，摩擦速度の最大は 10m/s，温度は  $-1 \sim -15^\circ\text{C}$  で行われた。試料の氷はポリエチレンの円筒に水を入れ冷蔵庫の中に  $1\mu\text{m/s}$  程度のゆっくりした速度で下ろしながら凍らせて作った。

図 109，図 110 は速度や温度を変えて得られた結果である。摩擦係数は速度を  $V$  として， $V^{-1/2}$  に比例した。速度の早いところでは滑走体の材質による違いはなかった。刃の振動を防ぐため，刃と振り子の間に振動吸収ゴムを挟んで固定した。

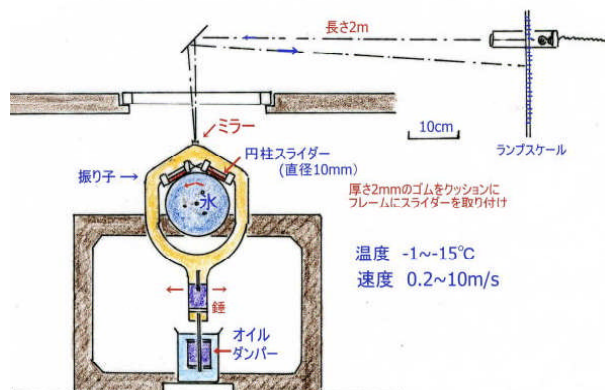


図 108 Evans らの実験装置

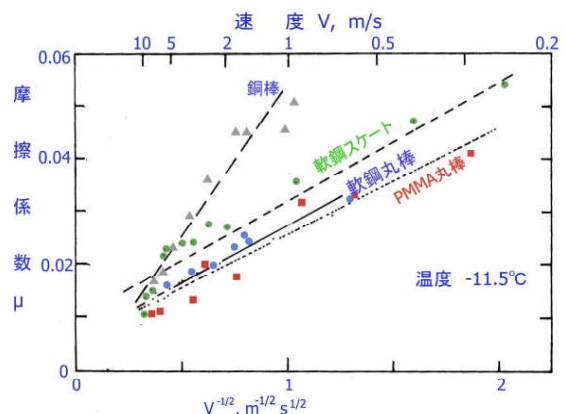


図 109 速度効果

速度が小さくなると摩擦は増大したが、熱伝導率の大きい銅棒の摩擦の増大が著しかった。次に温度を変えたとき、摩擦は温度が下がるにつれ直線的に増大することが示された。

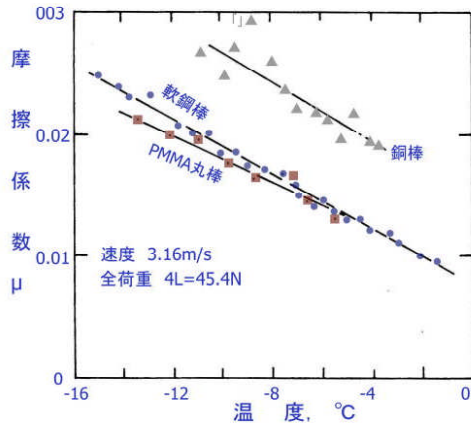


図 110 温度効果

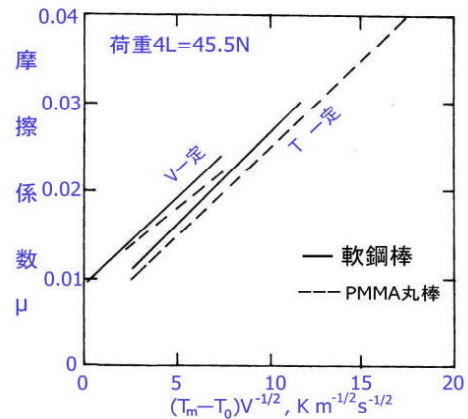


図 111 速度と温度に対する摩擦係数

摩擦に使われたエネルギーの殆どは熱となって滑走体や摩擦材に流れたり、融解に使われる。エバンスらはスケート（滑走体）、氷円柱に伝わる熱を推定し、摩擦エネルギーを分類した。単位の距離移動する間に、滑走体に流れる熱  $F_r$  は接触面積  $A$ 、氷の融点を  $T_m$ 、氷の温度  $T_0$  を使って

$$F_r = A k(T_m - T_0)/V \quad (42)$$

[滑走体は同じ面が繰り返し摩擦されるから、滑走体内部の温度分布は定常状態になっていると考えられる。滑走体に流れる熱流  $F_r$  は  $F_r = 4ak(T_m - T_0)$  であり、単位の移動距離当たりの熱流にすると、移動時間は  $1/V$  なので、 $F_r = 4ak(T_m - T_0)/V$ ]

氷の温度  $T$  は摩擦面からの深さを  $z$ 、熱拡散係数を  $D$ 、時間を  $t$  として、

$$T_m - T = (T_m - T_0) \operatorname{erf}[z/(\pi Dt)^{1/2}] \quad (43)$$

となる。 $\operatorname{erf}$  は誤差関数 (error function) である。

摩擦面 ( $z = 0$ ) から氷に流れる熱流  $q$  は、氷の熱伝導率を  $\kappa_i$  として、

$$q = -\kappa_i (\partial T / \partial z)_{z=0} = \kappa_i (T_m - T_0) / (\pi Dt)^{1/2} \quad (44)$$

となる。

滑走体と氷の接触面の長さを  $a$  とすると、接触時間  $t$  は  $t = a/V$  なので、この間に氷に流れる熱量  $F_i$  は

$$F_i = b \int_0^{a/V} q dt = 2 \kappa_i (T_m - T_0) b [a/(\pi DV)]^{1/2} \quad (45)$$

となる。

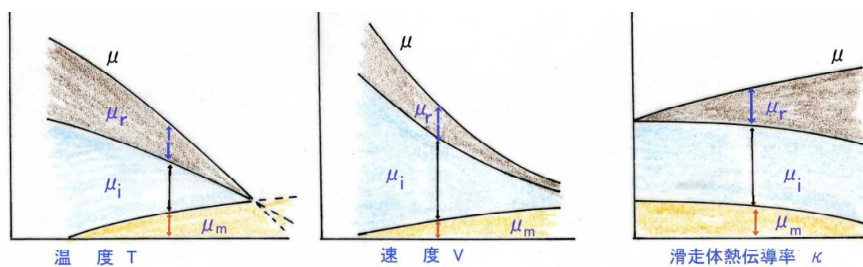


図 112 摩擦熱の配分

摩擦抵抗  $F$  は

$$F = AK(T_m - T_0)/V + B(T_m - T_0)/V^{1/2} + F_m \quad (46)$$

$$\mu = F/W$$

$\kappa_i = 2.2W/mK$ ,  $b = 0.6mm$ ,  $a = 1.5mm$ ,  $D = 1.2 \times 10^{-6}m^2/s$ ,  $T_0 = -11.5^\circ C$ ,  $W = 11N$ ,  $V = 1m/s$  とすると  $T = -1.2^\circ C$ ,  $\mu_i = 0.048$  となる。 $L$  を融解熱  $L=334kJ/kg$ , 氷の密度を  $\rho = 917kg/m^3$  とすると,  $\mu_m W = H \rho bc$  なので,  $\mu_m = 0.005$ ,  $W = 11N$ ,  $b = 0.6mm$  の場合, 発生する水膜の厚さは  $c = 0.3\mu m$  となる。

エーコック・マックエルテ・カラブレス (Akkok, M., McC Elttes, C.M., Calabrese, S.J., 1986) はリング状の氷試料の上に曲率半径 70mm, 12mm の 3 つの滑走体を氷の上に回転させた。氷試料の直径は 100mm であった。滑走体はスチール (表面粗さ  $0.12\mu m$ ), ナイロン (表面粗さ  $1.5\mu m$ ) およびガラスであった。スチール, ガラス, ナイロンのリングの上に氷の滑走体を滑らせる試験も行われた。試験速度は  $0.05 \sim 5 m/s$ , 荷重は 30, 75, 150N (一個のスライダー当たりの荷重), 温度は  $-10, -20, -30^\circ C$  であった。

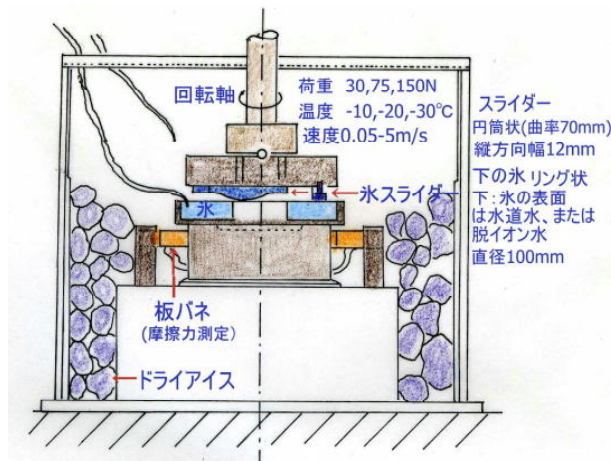


図 113 エーコックらの摩擦装置

単位時間, 単位面積当たりには発生する摩擦熱  $Q$  ( $W/m^2$ ) は, 摩擦係数を  $\mu$ , 圧力を  $P$  (Pa), 速度を  $V$  (m/s) として,

$$Q = \mu P V \quad (47)$$

摩擦面の温度上昇  $\Delta T$  は熱伝導率を  $\kappa$  ( $W/mK$ ), 密度を  $\rho$  ( $kg/m^3$ ), 比熱を  $c$  ( $2.1J/gK$ ), 時間を  $t$  として

$$\Delta T = 2Q(t/\pi \kappa \rho c)^{1/2} \quad (48)$$

となる。

滑走体の長さを  $B$  とすると最大接触時間  $t$  は  $t = B/V$  となるので, 摩擦面の最大温度上昇  $\Delta T_{max}$  は (47), (48) 式から, 滑走体の後端で温度が最大となり,

$$\Delta T_{max} = 2 \mu P (BV/\pi \kappa \rho c)^{1/2} \quad (49)$$

となる。

平均温度  $\Delta T_{mean}$  は

$$\Delta T_{mean} = 0.68 \mu P (BV/\kappa \rho c)^{1/2} \quad (50)$$

となる。

摩擦面に許される最大温度 (氷の融点) を  $T_m$ , 接近する試験片の温度を  $T_a$  とすると, 摩擦係数  $\mu$  は

$$\mu = C [(T_m - T_a)/P] (\kappa \rho c/BV)^{1/2} \quad (51)$$

となる。

ただし, 定数  $C$  は通常は 1.46 に等しい。

水の粘性係数を  $\eta$  ( $= 0.00176Pa \cdot s$ ), せん断応力を  $\tau$  とすると, 水膜の厚さ  $h$  は

$$h = \eta V / \tau = \eta V / \mu P \quad (52)$$

で与えられる。

水膜の粘性による摩擦係数  $\mu_{film}$  と熱伝導による摩擦係数  $\mu_{cond}$  は、

$$\begin{aligned} \mu_{film} &= (1/P) \{ \eta V \rho_i [c_i (T_m - T_a) + L] / 2B \}^{1/2} \\ \mu_{cond} &= (1/P)^2 \Delta T (\kappa \rho c / VB)^{1/2} \end{aligned} \quad (53)$$

となる。

氷（滑走体）の中へ流れる熱と水膜の粘性抵抗の比を R とすると

$$R = [0.354V / (T_m - T_a)] (\eta \rho_i L / \kappa \rho c)^{1/2} \quad (54)$$

となる。ただし、L は氷の融解熱、 $\rho_i$  は氷の密度である。

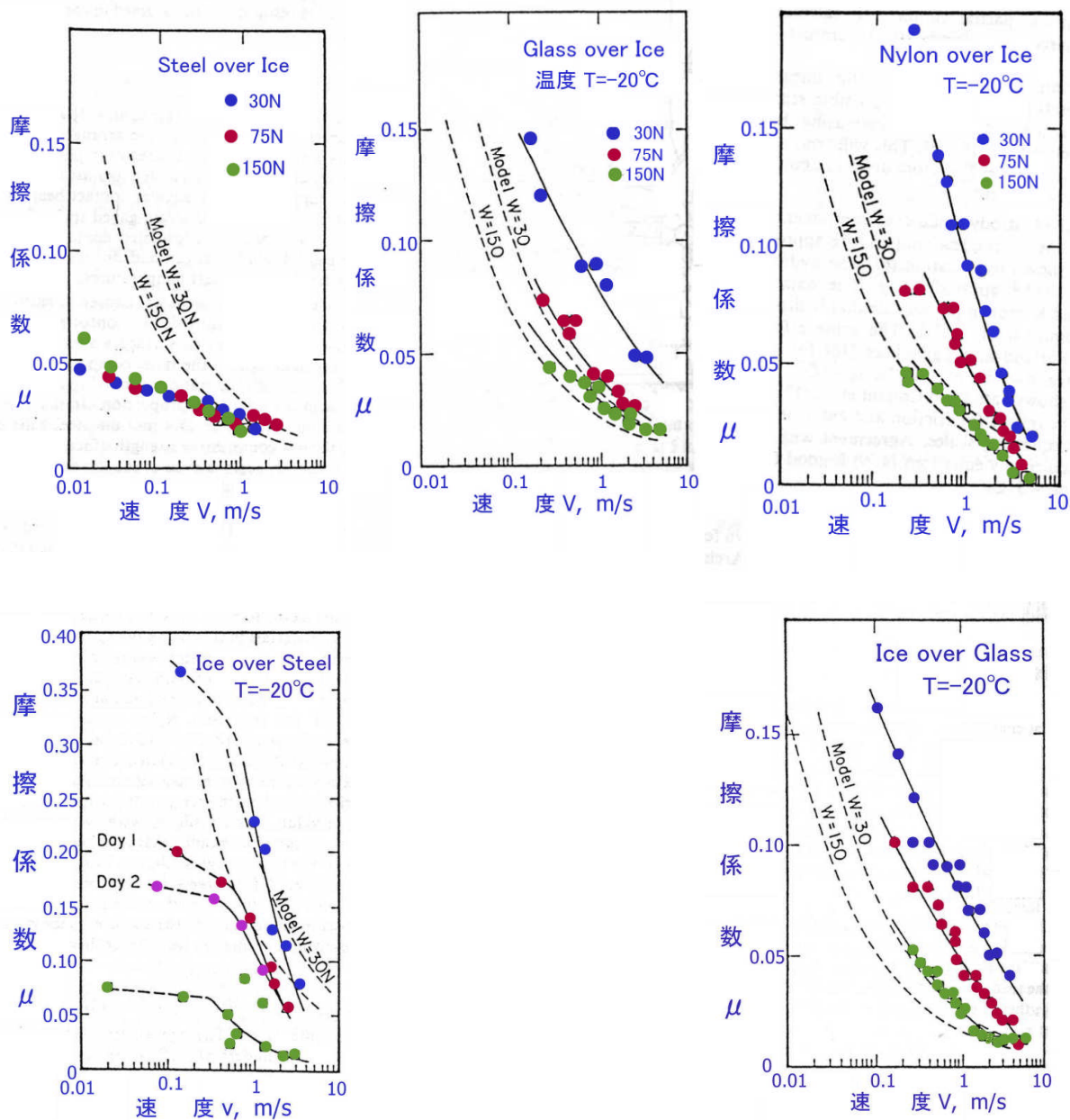


図 114 Akkok, M., McC Eltes, C.M., Calabrese, S.J. (1986) の実験結果

## 14.2 滑走中のスキーの底面に発生する水膜の厚さの測定

オーストリア、インスブルック大学のアンバッハとメイヨー (W.Ambach & B.Mayr, 1981) はスキーの底に 10mm 角の櫛型電極 (図 116) を貼り付け、滑走中の誘電率の変化からスキーの底面と雪面の間に発生する水膜の厚さを測定した。氷と水の誘電率 (図 115) は周波数によって異なる。水は  $10^2 \sim 10^6 \text{ Hz}$  の広い周波数に対して 90 程度の高い一定の誘電率を示す。氷の方は  $10^2 \sim 10^4 \text{ Hz}$  の領域で誘電率が減少し  $10^5 \text{ Hz}$  以上の高い周波数に対しては誘電率 3 程度の小さな値を示す。したがって、 $10^5 \text{ Hz}$  以上の高い周波数に対する誘電率を測定することで水の占める割合を決定できると考えた。

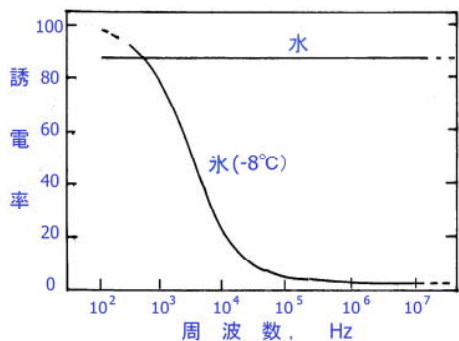


図 115 氷と水の誘電率の周波数特性

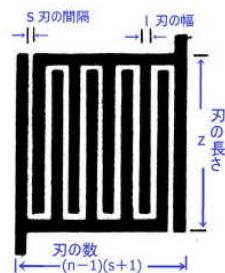


図 116 水膜の厚さを測る櫛形電極 (Ambach ら, 1981)

図 116 は櫛形電極を示し、この電極をスキーの底に貼って時速 0 ~ 60km/h で滑ったときの記録が図 117 に示されている。水膜の厚さは 4 ~ 12 $\mu\text{m}$  に変化しているのが示されている。

表 21 滑走するスキーの底に発生する水膜速度 : 20km/h (Ambach ら, 1981)

雪温	気温	水膜厚さ
0 °C	3.0 °C	13.5 $\mu\text{m}$
0	-0.7	10.6
-1	-2.0	6.5
-1	-3.0	6.0
-1.3	-2.5	5.7
-4.0	-4.5	5.0

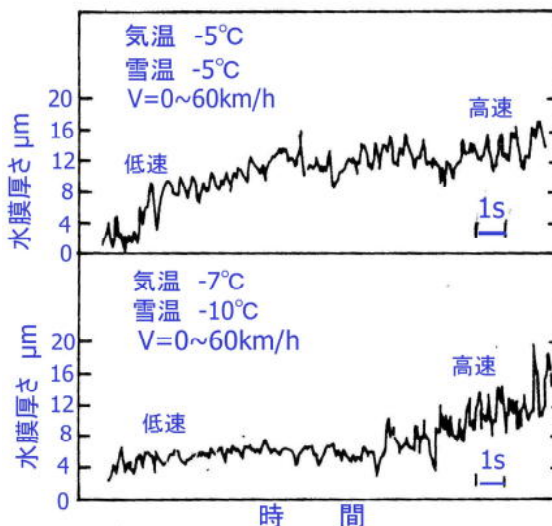


図 117 水膜厚さの記録例 (Ambach ら, 1981)

温度を変えたときの水膜の厚さをスキーの底に塗るワックスを変えて測定した結果が図 118 である。

注 : 5~10 $\mu\text{m}$  は潤滑のための水膜厚さとしては妥当な値といえるが、この水膜厚さで実測された摩擦抵抗を説明するかどうかの検討が欠かせない。



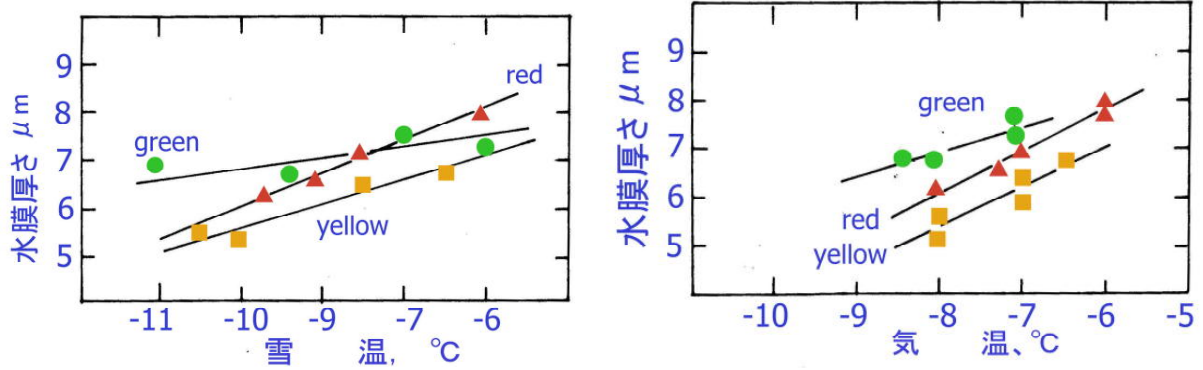


図 118 スキーワックスを変えたときの水膜 (Ambach ら, 1981)

(補足) ペッカ・オクサネン (Pekka Oksanen, 1982) は図 114 の装置を使って、温度を  $-1$ 、 $-5$ 、 $-15$  °C、荷重を 10, 30, 45N、速度を 0.5, 1, 2, 3m/s として回転するリング状氷の上の滑走体の摩擦を調べた。得られた摩擦の結果は表 22 のようになった。

表 22 氷と氷の動摩擦係数

速度 m/s	荷重 N	-15 °C	-5 °C	-1 °C
0.5	10	0.036	0.024	0.012
	30	0.027	0.019	0.009
	45	0.025	0.017	0.008
1	10	0.025	0.020	0.016
	30	0.019	0.015	0.012
	45	0.017	0.014	0.011
2	10	0.018	0.019	0.023
	30	0.014	0.014	0.018
	45	0.012	0.013	0.016
3	10	0.015	0.020	0.028
	30	0.011	0.015	0.022
	45	0.010	0.014	0.019

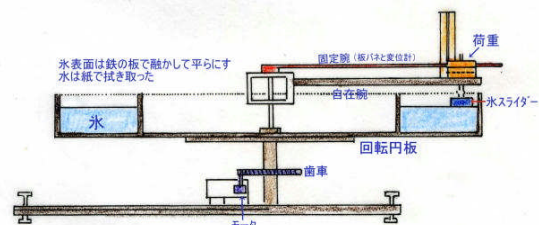
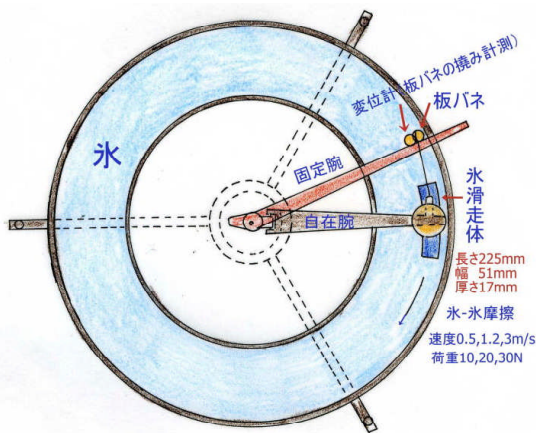
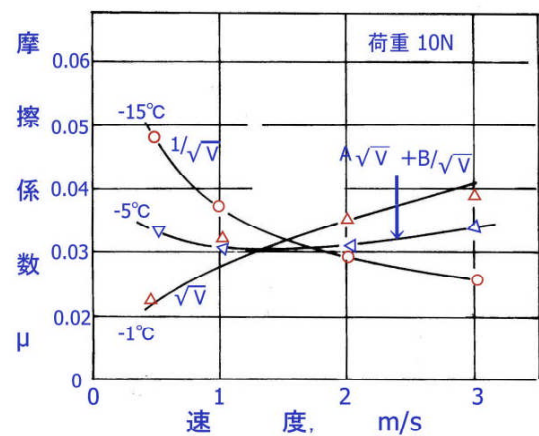


図 114 オクサネンの実験装置

オクサネンは回転する氷や滑走体に流れる熱流および融解に使われる熱流を計算し、摩擦係数や水膜の厚さを与える式を導いた。

水膜の粘性による抵抗  $F_v$  は

$$F_v = \eta_0 (v/d) A \quad (55)$$

ただし、 $\eta_0$  は水の粘性係数、 $V$  は速度、 $d$  は水膜の厚さ、 $A$  は真の接触面積である。

矩形（滑走方向に長さ  $b$ ）の滑走面が平滑な氷の上を滑るとすると、 $b/v$  の時間の間に発生する熱  $Q_f$  は、荷重を  $F_N$  として

$$Q_f = \mu F_N V (b/V) \quad (56)$$

時間  $t = b/v$  の間に回転する氷に流れる熱は

$$Q_{ci} = (\lambda_i ab \Delta T_i / \delta) (b/v) \quad (57)$$

ただし、 $\lambda_i$  は氷の熱伝導率、 $\Delta T_i$  は接触している界面の温度とバルクの氷との温度差、 $\delta$  は熱が伝導される層の厚さである。この熱は同じ層に蓄えられる熱に等しいので、氷の密度を  $\rho_i$ 、氷の比熱を  $c_i$  として

$$Q_{ci} = ab \Delta T_i (b/2v)^{1/2} (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} \quad (58)$$

となる。

滑走体に流れる熱流を  $Q_{cs}$ 、滑走体の方の温度差を  $\Delta T_s$  とすると、全熱流  $Q_c$  は

$$Q_c = Q_{ci} + Q_{cs} = ab (b/2v)^{1/2} [\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2}] \quad (59)$$

厚さ  $d$  の層の氷の融解に要する熱  $Q_m$  は

$$Q_m = abdL \rho_0 \quad (60)$$

となる。 $L$  は氷の融解潜熱、 $\rho_0$  は水の密度である。

$Q_f = Q_c + Q_m$  なので、(56)、(59)、(60)式から、水膜の厚さ  $d$  を与える式が導かれ、

$$d = (1/L \rho_0) [(\mu F_N/a) - (b/2v)^{1/2} [\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2}] + abdL \rho_0] \quad (61)$$

となる。 $F = \mu F_N$  を使うと、(61)式から摩擦係数  $\mu$  を与える式が導かれ

$$\mu^2 - (a/F_N) (b/2v)^{1/2} 2[\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2}] \mu - \eta_0 v A h \rho_0 a / F_N^2 = 0 \quad (62)$$

$A = nab$ 、 $H_1 = F_N/A$ 、 $a = b = (F_N/nH_1)^{1/2}$  とすると、(62)式の解は

$$\mu = n^{1/4} H_1^{-3/4} F_N^{-1/4} \{ (1/2) (1/2v)^{1/2} [\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2}] + [(1/8v) (\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2})^2 + \eta_0 v L \rho_0]^{1/2} \} \quad (63)$$

$\Delta T_1$  が大きいとき（水膜は発生しない）

$$\mu = n^{1/4} H_1^{-3/4} F_N^{-1/4} (1/2v)^{1/2} [\Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \Delta T_s (\lambda_s c_s \rho_s)^{1/2}] \quad (64)$$

$\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$  が小さく、温度が  $0^\circ\text{C}$  に近いときは

$$\mu = (\eta_0 v L \rho_0 a / F_N H_1)^{1/2} = n^{1/4} H_1^{-3/4} F_N^{-1/4} (\eta_0 v L \rho_0)^{1/2} \quad (65)$$

$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 0$  のときは

$$d = \mu F_N / L \rho_0 a = (\eta_0 v A / L \rho_0 a)^{1/2} \quad (66)$$

となる。

滑走体へ流れる熱  $Q_{cs}$  は

$$Q_{cs} = ab \Delta T_i (\lambda_s / \delta_s) (b/v) \quad (67)$$

となる。したがって、(65)式は

$$\mu = n^{1/4} H_1^{-3/4} F_N^{-1/4} (1/2v)^{1/2} \Delta T_i (\lambda_i c_i \rho_i)^{1/2} + \lambda_2 \Delta T_i / H_i \delta_2 v \quad (68)$$

となる。

オクサネンは次の表の値を仮定してエバンスらの実験結果をうまく説明した。

表 24  $\Delta T_i$ ,  $\Delta T_s$ ,  $H_i$ ,  $n$  の仮定値 銅, アクリル, 氷の熱伝導率  $\lambda$ , 密度  $\rho$ , 比熱  $c$

温度, °C	-15	-5	-1		銅	アクリル	氷
$\Delta T_i$ , °C	10	1	0	$\lambda$ , W/mK	386	0.22	2.2
$\Delta T_s$ , °C	0	0	0	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	8960	1200	916
$H_i$ , MPa	60	5	2	$c$ , J/kgK	389	14000	2090
$n$	20	20	20				

### 14.3 摩擦融解の実験と理論

対馬・吉田(1969)は回転する氷や雪の円板上に、リング状のアクリル板を摩擦(図 120 左)して、溶け水が遠心力で飛び出すことを観察するとともに、氷試料の上にも放射状に細長いつららの形成されるのを観察(図 120 右)した。摩擦速度は 10 ~ 20m/s であった。この摩擦は水膜の粘性抵抗で説明された。

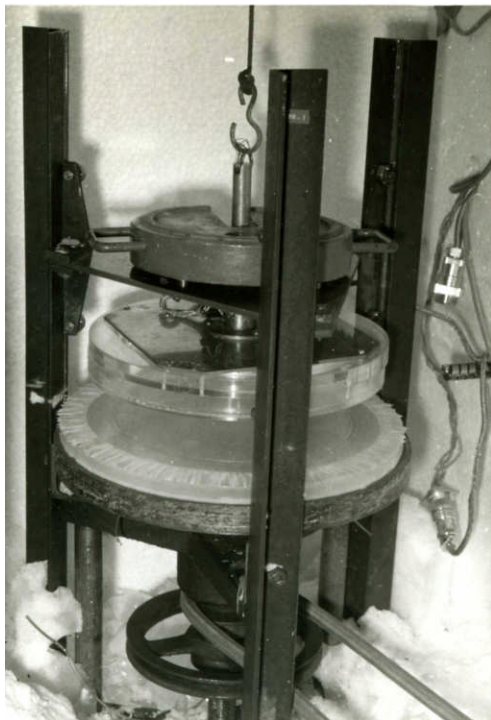


図 120 左: 回転円盤(氷)ーリング摩擦装置と右摩擦融解で生じたつらら

リングの底面全体が密着しているとし、摩擦係数を  $\mu$ , 単位面積当たりの接触圧力を  $p$ , 速度を  $V$  とすると、発生する摩擦熱  $q$  は

$$q = \mu pV$$

で与えられる。

摩擦熱の一部  $q_a$  はアクリル樹脂(スライダー)へ、残り  $q_i$  は氷の中へ熱伝導によって逃げる。各接触面の温度上昇  $u_a$ ,  $u_i$  は

$u_a = 2q_a \nu_a (t/\pi)^{1/2}$      $u_i = 2q_i \nu_i (t/\pi)^{1/2}$   
 となる。ただし、熱伝導率  $\kappa$ 、比熱を  $c$ 、密度を  $\rho$  とし、 $\nu = (\kappa/c\rho)^{1/2}/\kappa$  であり、  
 $\nu_a = 1/(c_a \rho_a \kappa_a)^{1/2}$      $\nu_i = 1/(c_i \rho_i \kappa_i)^{1/2}$   
 である。

界面の温度は等しいので、

$$q_a \nu_a = q_i \nu_i$$

一方、熱  $q$  は  $q_a$  と  $q_i$  の和に等しいので、

$$q = q_a + q_i$$

である。

$q_a$ 、 $q_i$  を求め、表面温度の式に代入すると

$$u = u_a = u_i = 2q [\nu_a \nu_i / (\nu_a + \nu_i)] (t/\pi)^{1/2}$$

図 121 熱流

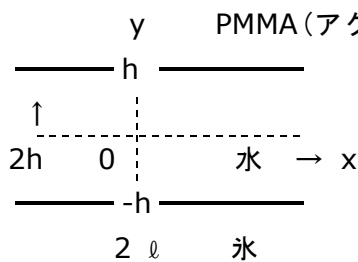
となる。

摩擦面の温度が  $T$  °C 上昇するための時間を  $t_0$  とすると、

$$t_0 = [T(\nu_a + \nu_i) \pi^{1/2} / \nu_a \nu_i q]^2$$

となる。

融解水の移動速度の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  成分を  $u$ 、 $v$ 、 $w$  とする。氷の表面が溶けて垂直上方に溶け水が速度  $2V_0$  で吹き出されるとする。 $z$  方向には摩擦速度  $W_0$  で移動する。



$$-l < x < l, \quad y = -h \text{ で } u=0, \quad v=2V_0, \quad w=W_0$$

$$-l < x < l, \quad y = h \text{ で } u=v=w=0$$

の境界条件で、融解水の運動方程式は

$$0 = -\partial p / \partial x + \rho w^2 / R + \eta (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2)$$

$$0 = -\partial p / \partial y + \eta (\partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2)$$

$$0 = \eta \partial^2 w / \partial y^2$$

となる。

図 122 氷の融解

境界条件と、上の運動方程式および次の連続の式

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0$$

を満たす解は

$$u = (3V_0/2h)x(h^2 - y^2) + (\rho W_0^2 h^2 / 4R \eta) [7/12 - (1/3)(y/h) + (1/3)(y/h)^2 - (1/12)(y/h)^4]$$

$$v = (V_0/2h^3)y(y^2 - 3h^2) + V_0$$

$$w = (W_0/2)[1 - (y/h)]$$

$$p = (3\eta V_0/2h^2)(y^2 - h^2 - x^2 + l^2)$$

ただし、 $x = \pm l$  で  $p = 0$  であるとした。

水膜の中の  $y$  方向の垂直成分を  $\sigma_y$  とすると、

$$y = h \text{ で } P/(2\pi R) = \int_{-l}^l -\sigma_y dx \quad \sigma_y = 2\eta (\partial v / \partial y) - p$$

$$P/2R = 2V_0 (l/h)^3$$

水膜の中の応力の  $y$  軸に垂直な面に働く  $z$  方向の剪断成分を  $\tau_{yz}$  とすると

$$y = h \text{ で } -F/2\pi R = \int_{-l}^l \tau_{yz} dx \quad \tau_{yz} = \eta (\partial w / \partial y + \partial v / \partial z)$$

$$F/2\pi R = \eta (W_0/2h)^2 l$$

実験では摩擦面の内側に伸びるつらは観察されなかった。つまり、直線 A と B との左

端を結ぶ直線を越えて、左側へ流れる水は存在しなかった。

$$x=l \quad \text{で} \quad \int_{-h}^h u dy = 0$$

$$2V_0 l = W_0^2 h^3 / 5 \eta R$$

これらの式から水膜の厚さが決定される。

彼らの実験に対しては水膜の厚さ  $2h$  が  $7 \sim 50 \mu\text{m}$  と計算された。

### 15. 海氷の摩擦

海氷は氷体内に高濃度の海水つまりブラインを含んでいる。したがって、海氷と金属板、プラスチック板等との摩擦においては、摩擦面にブラインが流出して、液体で濡れた状態の摩擦が行われる。このように摩擦における海氷の特異性は摩擦面に液体を含むことである。

海氷の摩擦は砕氷船、石油掘削塔の支持脚、河川などにかかる橋の橋脚などの氷による損傷、倒壊等と関係して重要である。これらの場合、氷塊が大きな力で摩擦される。そのような摩擦に有効な実験的知見を得るためには、少し大き目の氷試料について、大きな荷重のもとでの試験が好ましい。このような観点から、図 123 に示す試験装置が試作された。

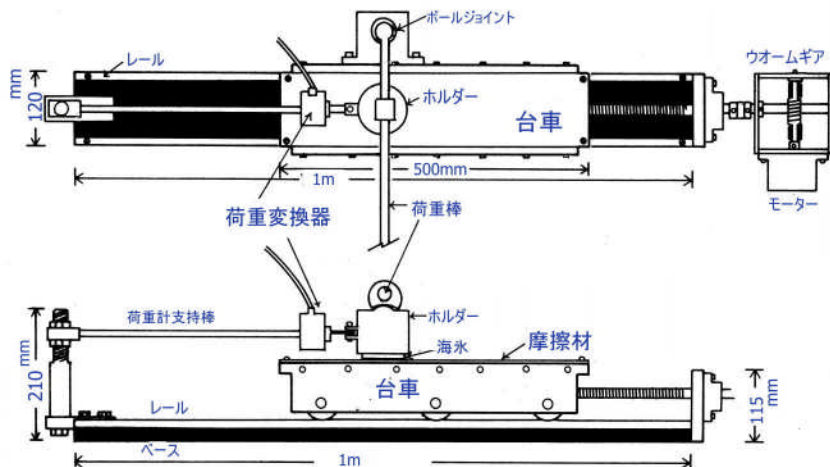


図 123 海氷の摩擦実験装置

長さ 1m の二本のレールの上を、摩擦試験片を乗せた台車が動く。台車は幅 0.12m、長さ 0.5m であった。海氷試料は円筒状に切り出したもので円形の底面（底面積  $4.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ）を摩擦面とした。接触面の見かけの圧力は  $(0.3 \sim 25) \times 10^4 \text{ Pa}$  に相当する。速度は最大 50mm/s、最小  $3.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  の間で変えられた。荷重は挺子の原理で 110N から 1100N まで加えられた。得られた結果は試験片の表面粗さに著しく依存する結果となった。台車の上に底の浅い海水の入った水槽を載せ、水槽内に摩擦試験片を置くことにより、海水中での摩擦条件を再現できた。



摩擦機構の観点からは、海氷はブラインという液体を内蔵していて、摩擦面に液体を供

給しながら滑るから、摩擦面は濡れた状態となることである。液体が潤滑作用をして海水の摩擦を小さくしているのだとすれば、液体を含まない純氷では大きな摩擦になるはずである。海水は融点以下の温度でも液体(ブライン)を含んでいるから、低い温度の滑りで液体による潤滑効果の有無を調べられるのも魅力といえる。

得られた結果を図 124 (海水), 図 125 (純氷), 図 126 (人工海水), 図 127 (海水中) に示す。表 25 には海水 (アラスカ最北端バロー), 人工海水, 市販氷 (ブラインなし) の三種の氷の試験結果が示されている。摩擦係数の値は三種の氷の間で大小の順位が入れ替わるものも認められるが、総じて、氷の種類による摩擦の違いは小さく、いずれも同一の摩擦機構に支配されていると考えられる。言い換えると、海水に含まれる液体が潤滑作用を果たして、摩擦係数を著しく減少させるという証拠は認められない。

図 124~図 127 では摩擦係数が 0.1~0.24 の大きな値も計測された。このような大きな摩擦係数を示すのは粗い面や粗い塗装面で真の接触面の強い剪断や掘り起こしで塗膜の摩擦する試験片であった。試験片の硬く粗い面が氷試料面にくい込むことによる掘り起こし抵抗の増大、塗装面では塗装の摩擦粉が氷にこすりつけられることにより氷試料表面の性質が変質するすることが摩擦を著しく増大させている。一方、平滑面の摩擦は小さく、塗装膜が平滑、かつ丈夫な試験片では小さな摩擦が計測された。海水と純氷の違いを見ても摩擦係数の値に大きな違いはない。結論として、海水は液体のブラインを含み、表面が濡れた状態で摩擦が行われるが、ブライン液による潤滑効果は認められないといえる。

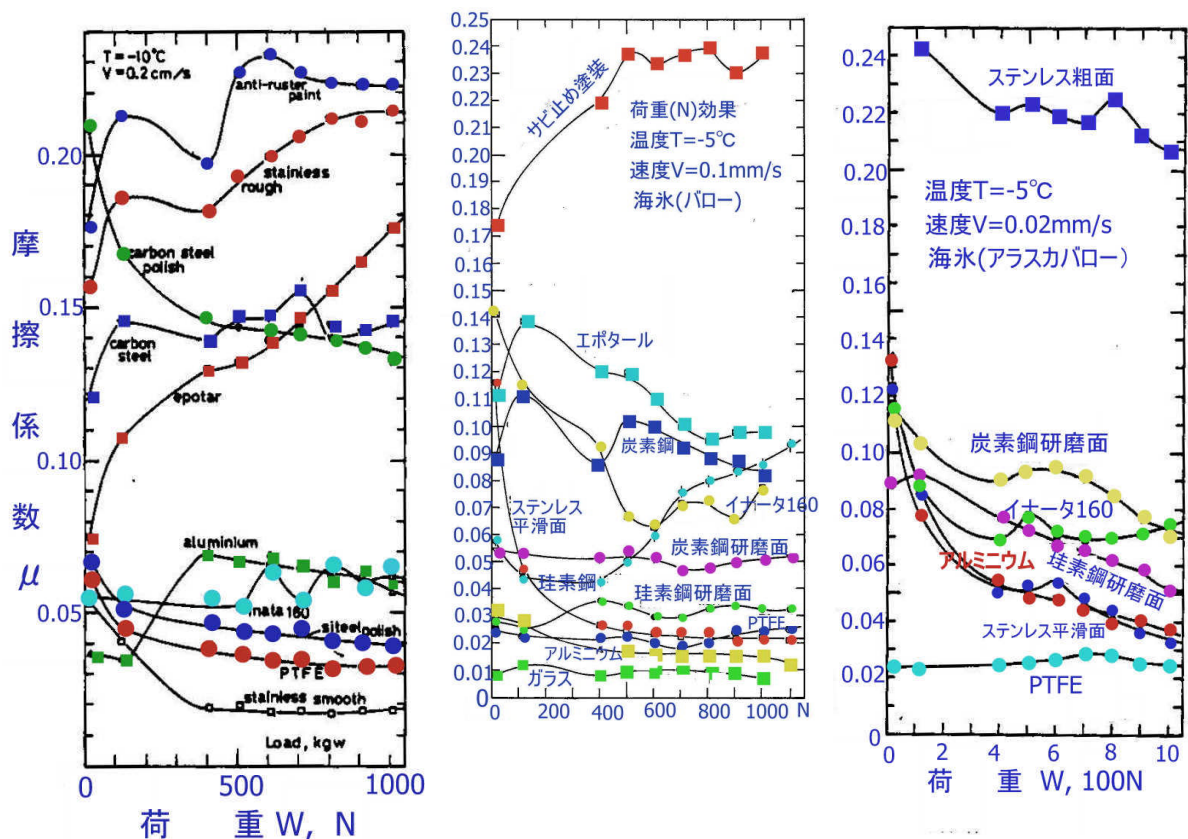


図 124 (海水)

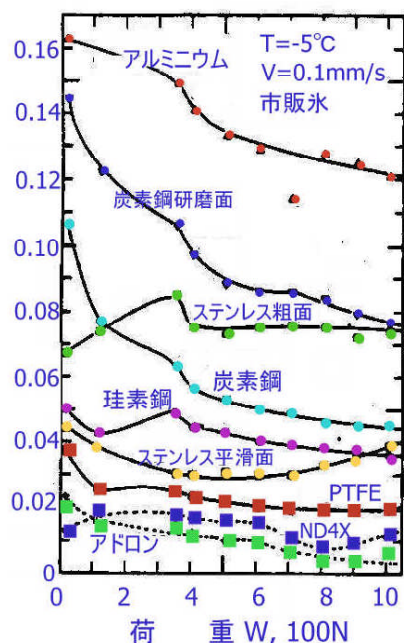


図 126 (人工海水)

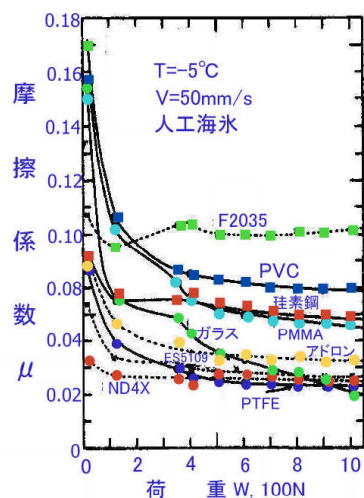


図 125 (純水)

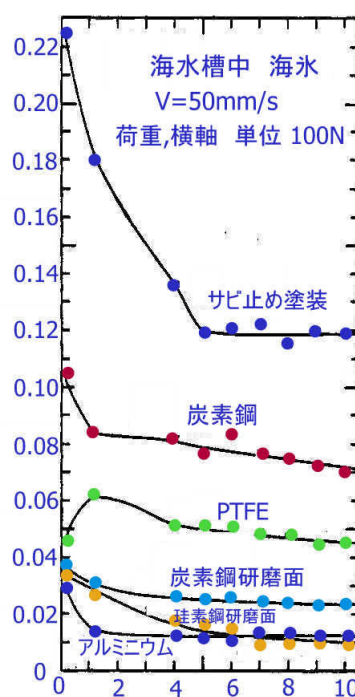


図 127 (海水中)

表 25 海水, 人工海水, 市販氷の摩擦係数 温度-5°C, 速度 2mm/s

	鉄	アルミニウム	ステンレス 平滑面	ステンレス 粗面	PTFE	PMMA	PE	鉄への塗装面		
								エポキソ樹脂	ウレタン	ND4X
海水	0.07	0.03	0.03	0.14	0.02	0.02	0.02	0.16	0.06	
人工海水	0.07	0.08	0.02	0.06	0.02	0.03	0.05	0.15	0.08	0.01
市販氷	0.10	0.10	0.04	0.08	0.02	0.25	0.05	0.24	0.08	0.02

表 13, 表 14 から氷が大変硬いこと, -10°Cの氷は銅の半分程度の硬さをもつことがわかった。だから, 氷を削るカンナの刃は摩耗し, 切れが悪くなる。ミクロトームの刃も簡単に切れ味が衰えていくし, 超硬バイト (コバルトやクリスタル) の刃もたたないほど硬いスピードスケートの滑走面でも, 滑っている間にエッジが摩耗していくから, コーナーでの氷への刃の食い込みが不十分になり, 滑りに影響を及ぼす。だから, 選手はときどき刃の研磨をする。

身近なところでは, 古くなったカラートタン屋根に刷毛で上塗り塗装をしても, 冬の間の屋根雪によって重大な損傷を受ける。落下した雪塊の底に塗料の膜が離ればなれに付着しているのが認められる。屋根雪の厚さを 1m としても, 塗装面に加わる平均圧力は 3kPa (=0.3kgf/cm<sup>2</sup>) にすぎない。このような小さな圧力でも塗装膜を剥離する雪の摩耗力に驚かされる。

氷海を航行する砕氷船や船舶の場合, 屋根雪とは比べものにならないくらい大きな氷塊に衝突したり, 船腹を氷塊にこすられて大きな力が及ぼされる。その結果, 氷で磨かれ船腹がピカピカになるといわれる。船体の塗料も摩耗が激しいから, 摩耗に強いイナ-

タ 160 など特殊な塗料が使われる。同様の氷と構造物の摩擦は灯台と海水、海中油田掘削塔や海洋構造物と海水との間でも問題となる。海水が構造物に及ぼす力は強大であるから、橋脚や灯台が破壊されたり、その他の海洋構造物が破壊されることがある。海水、流氷の衝突による建造物の破損を防ぐため、橋脚の氷塊に接する部分を傾斜させる、また摩擦を小さくするなどの工夫が行われる。

豪華客船「タイタニック号」が処女航海の最中、北大西洋で巨大氷山に衝突し、沈没、乗員・乗客 2201 人のうち 1490 人の尊い命が失われたことは余りに有名である。流氷の海は冷たく、海中に放り出された人は体温を奪われ、短時間に死に至る。

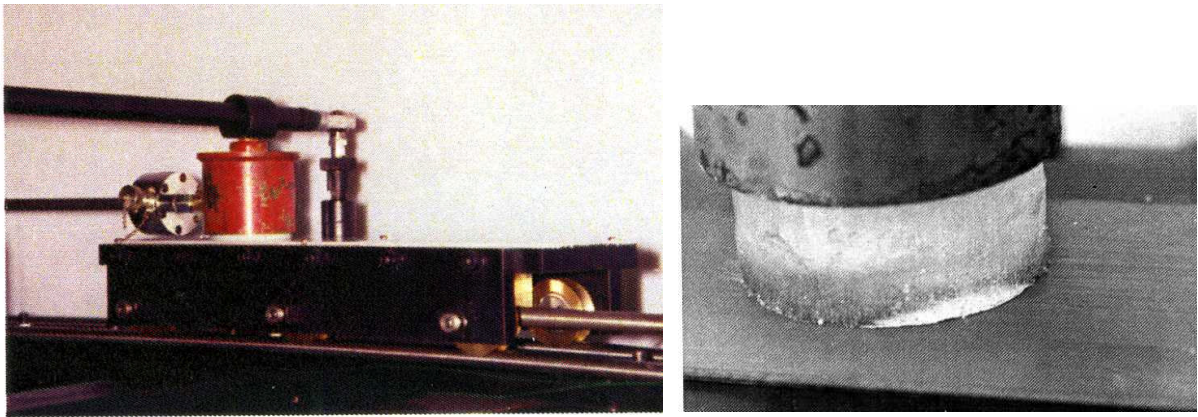
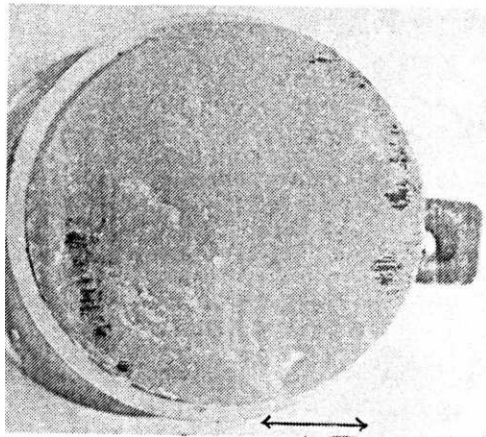


図 128 海水の摩擦 右：試験片（平板）上を滑る海水試料



海水に黒色の塗膜がこすりつけられている。  
矢印は滑走方向



## 16. 雪氷路面における自動車タイヤの摩擦の問題

氷は摩擦が小さいものの代表であり、一方、ゴムは摩擦が大きいものの代表である。この両代表を摩擦したときの摩擦係数がどういう値を取るか、また摩擦係数が温度や速度に対してどういう特性を示すかは大変興味ある問題である。実用面では、積雪寒冷地では圧雪や氷に覆われた路面上を自動車が走行する状況がしばしばあり、ブレーキを踏んでもタイヤがスリップして予想外に長距離滑ってしまい、またスリップ中はハンドル操作が効かなくなるため追突、衝突、路側や対向車線へのはみ出しなどが予想外の運動が発生し、人命に関わるような事故を伴うことも起こるのが問題である。このような問題に対処するため道路管理側、車両側双方で安全対策が進められてきたが、安全性の追求は今日も続けられている。タイヤの場合、滑り摩擦が大きければよいというわけではない。たとえば、ゴムタイヤ表面にタングステンカーバイドの鋌打ち込んだスパイクタイヤは、ブレーキをかけた(タイヤをロックし滑り摩擦に変わる)ときスパイク部分が氷を引っ掻いていく抵抗として自動車の運動エネルギーを消散させ短距離で停止させるものであった。緊急時に摩擦を大きくする効果は大きかったが、舗装の露出した路面を走行するときはアスファルト舗装面を摩耗させる欠点があった。飛散する粉塵を吸った人の健康被害や路面損傷が問題となり、結局のところ摩擦を大きくし自動車走行の安全性を高める点は評価されながらも負の側面を克服できなかったために法的に使用および製造が禁止となっただけである。

ゴムの摩擦に興味を持たれる別の理由として摩擦機構との関係がある。すでに氷の低摩擦機構として摩擦融解・水潤滑説の論理的矛盾を指摘したところであるが、ゴムは氷に対して滑り摩擦が大きいから、発熱も多く、融け水が発生し、水潤滑となりやすい。水潤滑が実現していれば、当然のこととして摩擦は小さくなるはずである。しかし、ゴムタイヤの摩擦はスキーの摩擦に比べ桁程度大きな摩擦係数を示し、水発生の可能性は最も高いのに摩擦係数はスキーやスケートよりはるかに大きいという矛盾がある。ゴムタイヤの滑りでは水は発生するがその水は潤滑には寄与していない。摩擦の主たる部分は他にあるということになる。

自動車の制動にはブレーキ板(円板)にブレーキ材を強く押しつける

- (1) 路面状態による摩擦の違い
- (2) 氷雪路面の摩擦(圧雪, 新雪, 氷, 路面雪氷の分類)
- (3) タイヤの種類による摩擦
- (4) ゴムの特性
- (5) タイヤの種類 スノータイヤ, スタッドレスタイヤ, スパイクタイヤ
- (6) タイヤの構造
- (7) タイヤの運動特性

制動時の摩擦

スリップ率と摩擦係数

Side Force

- (8) 摩擦を大きくするための工夫 ゴムにクルミの殻を含有させたり、マイクロポーラスを含んだタイヤとすることにより、掘り起こし抵抗の増大を狙っている。

タイヤを完全にロックしたとき、自動車はスリップ状態で滑り運動となる。自動車の質量を  $m$ 、初速度を  $V$ 、滑り摩擦係数を  $\mu$ 、ブレーキ（タイヤの回転をロック）をかけたことによる滑走停止距離を  $l_0$  とすると、

$$(1/2) mV^2 = \mu mg l_0 \quad \mu = V^2 / (2g l_0) \quad (69)$$

となる。この完全ロックではハンドル操作が効かななくなるという問題がある。そのため、タイヤを部分的に回転させる制動方法を導入した乗用車がある。この場合、ハンドル操作が若干確保されることのほか、タイヤの回転により新しいトレッドが路面に接するため、同一面が滑ることによる摩擦の低下を抑制する効果が期待されるという利点もある。

$$(1/2) mV^2 = \mu mg l_0' + (\text{ブレーキ材の摩擦})$$

$$\Delta l = l - l' \quad l : \text{回転により進んだ距離} \quad P \Delta l$$

$$\mu mg l' + P(l - l') = \mu mg l_0$$

$$\frac{\Delta l}{l_0 - l'} = \frac{\mu mg}{P_0}$$

つまり、 $P_0 > \mu mg$  なら  $\Delta l + l' < l_0$  となるので、制動停止距離が減少する。

摩擦実験ではゴムを直接握って手で滑らせ、触覚、視覚など感覚による摩擦現象の把握も大事であろう。半球状ゴムをガラス板に押しつけて滑らせると、ゴムの先端が潰れて円形の真の接触面が現れ、ガラス面に広がったまま運動と逆方向にわずかに撓むように変形しながら移動し、手には大きな抵抗が伝わる。次に、ガラス板を水中に浸してゴムを滑らせても手の感ずる抵抗は水のない場合と変わらない。氷の板の上にゴム球面を滑らせても同様の大きな抵抗を感ずる。氷の上にタングステンカーバイド球やアクリル球、ナイロン球ポリエチレン球の各球面を滑らせると氷の上には明瞭な溝や、筋、氷の削り屑、氷の再結晶・クラックなどの明瞭な傷が形成され、傷が顕著なほど摩擦も大きいのが普通であった。しかし、ゴムを滑らせる場合には氷表面には視認できるほどの傷が形成されないのに、大きな摩擦を示す特異性がある。なぜ、このような不可思議な現象が起こるのだろうか。ゴムの真の接触面を観察すると、ゴムは接触面に垂直な方向に潰れながら、接触面内では広がり、運動と逆方向に撓んでいるのに気付く。ゴム先端の二点に印を付けて押しつけると、二点の距離が広がった状態で中心線から後方にずれた状態で滑っている。このときゴムは元の位置に戻ろうとするが接触面の氷が邪魔をして戻れない。つまり、ゴムは氷をグリップする力を及ぼしながら移動している。このグリップがあるためにゴムが氷面に対して大きな摩擦を及ぼすことが感じ取れる。氷の物性は温度によって変わるから、氷の状態によってはグリップが激減することもあるであろう。古いゴムで弾力を失ったゴムはグリップもゴムの撓みも感じられず、摩擦が大きくならないのを感じ取れる。

瓶の蓋を振って開ける場合、素手で開けようとしても充分力が伝わらずなかなか開かない。そんなとき、ゴム手袋で開けると力が効果的に伝わって蓋が開くのをよく経験する。ゴムが蓋材に広い面で密着し振り力を加えるとゴムが変形して蓋に力が伝わる。ゴム自体の変形が摩擦を大きくしているのに気付く。硬いゴムよりやわらかいゴムの方が摩擦が大きく効果的なことも体感できる。冬、硬い雪道を長靴を履いて移動すると新しい長靴は摩擦が大きい、古く弾力を失った長靴は滑りやすいことも知られている。

## 17. ころがり摩擦

荷重をW, ころがり摩擦抵抗力をFとするところがり摩擦係数 $\mu_R$ は

$$\mu_R = F / W$$

で表される。

硬鋼面上の硬鋼のローラーの場合,  $\mu_R = 0.001$

道路上でゴムタイヤをころがす場合でも $\mu_R$ は0.05程度である。

転がり摩擦は滑り摩擦に比べて100分の1程度に小さいので, 小さなエネルギーで物体の移動が可能であり鉄道, 自動車, 引き戸などに広く使われている。

ローラーが平らな板の上を転がりながら移動する場合, 板を図のようにローラーの移動方向に垂直な狭く垂直に長い板素片の集合体と考えるところがり摩擦の機構が理解しやすい。

各板素片は粘弾性体でありローラーの先端で押され, 後部では逆にローラーを押し返す。押される力と押し返す力が等しければ, 一度運動を始めたローラーはいつまでも運動を続ける。

押す力にくらべ押し戻す力が小さくなるにつれ摩擦が大きくなる。十分速い速度では板は弾性的に振る舞うので摩擦は小さい。一方, 十分遅い速度では粘性部分の復元が十分に行われる(氷のように永久変形する, つまり粘性に復元力に小さいものもある)ので摩擦も小さくなることが多い。粘性による復元には時間を要するため, 遅い方から速度を早めていくと, 十分に復元してローラーを押し戻す力を発揮出来ない速度領域が現れる。結局, 転がり摩擦は速度に対して極大値を示す。

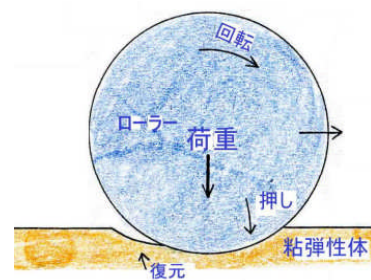


図 130 ローラーが板の上をころがりながら移動する物体

近年, 摩擦を扱う学問は総合摩擦学を意味するトライボロジー (Tribology, Tribos はギリシャ語で「こする」こと) と呼ばれるようになった。

## 18. 摩擦融解の検討

### 18.1 摩擦融解の内部矛盾

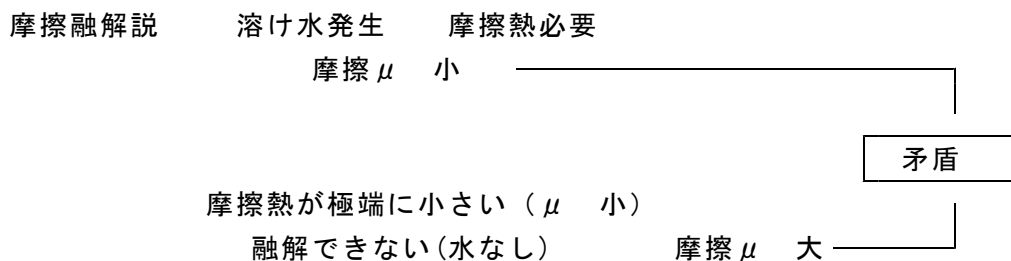
摩擦融解・水潤滑説は前章で見たように, 実験研究に基づいた理論が高度に発展し, 強固な鎧で防衛された感がある。

しかし, これらの論文では氷の結晶面による摩擦係数の異方性が議論されたことはない。もし, 摩擦融解・水潤滑説が氷の低摩擦の原因であるなら, 摩擦面に水が発生しないようにすれば, 摩擦が大きくなり, 溶け水が発生したとき非常によく滑るようになるはずである。第8章に述べた単結晶氷の摩擦に関する研究は主に低速, 低温領域で行われ, 摩擦融解のない条件であったにも拘わらず, 摩擦係数は小さいことを示した。また, 溶け水が介在しないから, 氷の結晶面によって摩擦係数が異なったとも解釈できる。この実験事実を素直に受け入れれば, 摩擦融解・水潤滑説への疑問と凝着説の妥当性は明白であると思

われるが、歴史的にはそうはいかなかった。

そこで、もっとわかりやすい形で摩擦融解・水潤滑説の問題点を指摘できないものかと探求した結果、以下に述べる摩擦融解・水潤滑説の内部矛盾を見抜くことができた(対馬, 2001)。

摩擦融解・水潤滑説は溶け水が付着力を激減させ、潤滑作用をするため氷の滑りを良くすると主張する。水が摩擦面に発生しなければ氷表面と滑走体間の真の接触部は凝着状態となり滑りは悪いと主張する。Bowden らは低速、低温条件によって摩擦融解の発生しない状態を実現し、摩擦が摩擦係数で 0.4 程度に大きいことを示した。問題はその結論(低速での大きな摩擦値)が一般に当てはまるものなのか、それとも Bowden らの実験に限っていえることなのかということである。著者の実験では摩擦融解の生じない条件下でも摩擦は小さいままだった。その理由は滑走体や摩擦条件の違いによるに違いない。



それはさておき、平板滑走面で溶け水が発生しない摩擦を実現するには、単位時間、単位面積当たり発生する摩擦熱を小さくすることが肝要である。それは摩擦そのものを小さくすることであり、たとえば、スピードスケートと氷の滑り摩擦が摩擦係数で 0.005 ということはすでに極めて小さい摩擦である。この状態では摩擦融解は発生しないと考えられる。仮に、さらに摩擦が小さい場合を仮想的に考えれば、発生する摩擦熱があまりに小さすぎて、氷が全く溶けない状態を想定できる。このとき、溶け水が発生しないから、摩擦は大きくなるのであろうか。パウデンらは摩擦は極めて大きな値になると主張した。しかし、冷静に考えれば、そもそも本命題そのものが矛盾していることに気づく。つまり、摩擦融解・水潤滑説は矛盾した学説である。熱は摩擦によって発生することを考えれば、摩擦熱が小さいことは、摩擦そのものが小さいということであり、つまりはよく滑るということである。これは、溶け水の発生が氷の摩擦を小さくするという摩擦融解・水潤滑説の矛盾である。

摩擦がある程度以上に大きいとき、発生する摩擦熱によって氷が溶け、滑りがよくなると言い換えなければならない。溶け水が発生できないとき、氷はさらによく滑るのである。だから、「溶け水」が滑りを良くする理由にはならない。

この説明を目からうろこが落ちたようだと率直に受け入れる人と、依然として、この指摘を無視し、内部矛盾に触れようとしない人もいる。どちらかという、専門家にかたくなな人が多いようである。

筆者は氷の摩擦研究を通して、人間の思考力はそれほど恐れるほどでもないとも思った。筆者はどちらかという理解力の乏しい部類、秀才からは縁遠いところにいた。研究者の世界に入ったとき、周囲の大学院生や先生方に劣等感を懐いていた。まして、外国の研究

者には太刀打ちできないと思った。そんな筆者に対し恩師の吉田順五先生や黒岩大助先生は身体を動かし、実験データで勝負するように助言された。ある時期は一心不乱に氷の摩擦実験に日々を捧げた。単結晶氷の摩擦の探求を続け、実験が深まるにつれ、自分独自の世界が開けていくように感じられた。それが翻って実験の励みになった。

私は些細なことで理解や納得できずに、ひっかかることもあった。そういうとき、すぐには解答が得られなくても、長い時間を掛けて考え続け探求を続けることにした。一方で、自分の体験、特に、自分の実験結果にこだわった。こだわり続けたといった方が正確かもしれない。私は今、学生には実験を通して真実や好奇心を追い求める狩人になれとやってきた。その追求の過程で、自分独自の世界が形成されるにつれ、自信が備わっていくものである。

## 18.2 Bowden & Hughes (1939) 論文の吟味

Bowden & Hughes (1939) の論文を吟味しようとする場合、論文には実測に即した「底面積－荷重－摩擦係数」の関係が明記されていないという壁に突き当たる。この記述の不十分さが後世の研究者による定量的議論を阻んできた。論文が水潤滑と断定した 0.02~0.04 程度の低摩擦値は氷の物性値を使えば凝着説で無理なく説明できる値と思われる。一方、水潤滑で説明しようとするれば水膜厚さが不合理なほど極端に薄くなってしまい摩擦痕の形成さえ説明できないと思われる。

圧力融解・水潤滑説は歴史的意味しかもたないのだけれども、Bowden & Hughes (1939) の論文における圧力融解・水潤滑説の批判および摩擦融解・水潤滑説の主張には以下に挙げる点で正当性が認められないと思われる。

1. スキーの底面積を  $0.5\text{m}^2$ 、真の接触面積を見かけの面積の 1000 分の 1、 $500\text{mm}^2$  としているが、根拠が曖昧である。Bowden らは真の接触面の圧力を  $1.5\text{MPa}$ 、融点降下を  $-0.12\text{ }^\circ\text{C}$  としている。(ここでは、氷の硬さとして桁違いに小さい値を採用して、融点降下を小さく見積もろうとする意図がうかがえる。 $-10\text{ }^\circ\text{C}$  での氷のブリネル硬さ  $100\text{MPa}$  を採用すると真の接触面積は  $5\text{mm}^2$ 、融点降下は  $-7.5\text{ }^\circ\text{C}$  と大きくなる。)
2. (本論文には指摘されていないが、圧力融解・水潤滑が否定される理由は氷の状態図から、氷の圧力融解には  $-22\text{ }^\circ\text{C}$  という限界温度が存在すること、圧力は必要条件であり、十分条件ではない。熱流が加わることによって融けることが可能になるのである。スケートは  $-22\text{ }^\circ\text{C}$  以下の低い温度でもよく滑る。大事な視点として  $-22\text{ }^\circ\text{C}$  より高い温度においても、融解には熱の供給が必要であるという点である。)
3. 一方、摩擦熱による融解の可能性として、発生する摩擦熱の全てが氷の融解だけに使われる場合を例に、真の接触面が見かけの接触面の 1000 分の 1 とすると、 $0.8\mu\text{m}$  の水膜を作ると主張している。ここでも、真の接触面積を氷の硬さから見積もられるように、見かけの接触面の 10 万分の 1 とすれば、水膜の厚さは  $80\mu\text{m}$  の厚いものになるはずである。
4. (流体潤滑を仮定すれば、0.05 の摩擦係数を説明できない。体重  $750\text{N}$  の人の乗ったスキーの摩擦抵抗は  $37.5\text{N}$  となる。流体摩擦の抵抗は  $(1.78 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}) [(4\text{m/s}) / (8 \times 10^{-5}\text{m})] (5 \times 10^{-6}\text{m}^2) = 4.45 \times 10^{-4}\text{N} = 4.45 \times 10^{-4}\text{N}$  と求まる。これはスキーの実際の抵抗の 1000 分の 1 にすぎない。水膜を 100 分の 1 ( $0.8\mu\text{m}$ ) としても、実際の抵抗

の10分の1にすぎない。こんなに薄くてはシュープールの発生も説明できない。

5. 摩擦融解・水潤滑説は摩擦が小さいことを主張できるが、実測値を説明できない。Bowdenらは模型スキーの底面積を2～31mm<sup>2</sup>まで15倍に変えた測定を行った。4m/sの高度では動摩擦係数0.02程度の一定値を得た。これは真の接触面積が荷重に比例することを意味している。最低の2mm<sup>2</sup>の場合、動摩擦係数0.016、荷重3Nとすると、摩擦抵抗は0.048Nとなる。水膜の厚さdは、仮に、全面接触とすると $0.048N = (1.78 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}) [(4\text{m/s})/d] (2 \times 10^{-6} \text{m}^2)$ から $d = 0.3 \times 10^{-6} \text{m}$ 、接触面の圧力は1.5MPaにすぎない。真の接触面を見かけの接触面の1/10と仮定しても2～31mm<sup>2</sup>の滑走体に対する水膜の厚さは0.03～0.003μmという極端に薄いものになってしまう。
6. (しかし、この場合も摩擦面に溶け水が存在せず、突起部の接触によって形成される結合部をせん断する力が摩擦抵抗であるとすると、せん断強さsは $0.048N / (2 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-8} \text{m}^2) = 0.24 \sim 2.4 \text{MPa}$ となり、氷のせん断強さとして妥当な値が導かれる。)
7. (Bowdenらの実験結果は融解水のない固体間の摩擦としても説明できる。)
8. Bowdenらの図4には滑走体の材質を変えたときの熱伝導率の影響が取り上げられている。氷-氷の動摩擦係数が最も小さく、氷と真ちゅうの動摩擦係数が最大、氷-エポナイトの動摩擦係数が中間の値となっている。これは摩擦融解説を支持する有力な証拠の一つとして認められてきたものである。

付着力だけから考えれば、氷が最大、エポナイトが最小、真ちゅうが中間の動摩擦係数となるはずである。ところで、氷のように硬くて、せん断強さの小さい物質では滑走体が氷に傷をつけていく抵抗を無視できない。スパイクタイヤの摩擦が大きいのはスパイクが雪面や氷面に傷をつけていく抵抗が大きいからである。氷同士ではこの掘り起こし抵抗は極めて少ない、真ちゅうは金属であり硬いから、氷に傷をつける。その抵抗が大きいために動摩擦係数が最大になったと考えられる。エポナイトも金属ほどではないが硬いから溝掘り抵抗を生ずる。温度が低いほど氷は硬くなるから傷をつけるのに大きな力が費やされ、摩擦係数が増大する。このように熱の流れを使わなくとも図4の結果は説明可能である。

9. 荷重の効果も同様に溶け水を導入することなしに説明可能である。荷重を受けて雪粒の先端がつぶれ、真の接触面が形成される。荷重の小さい間は先端のつぶれる面積も小さいから、真の接触面積は荷重に比例し、したがって、摩擦抵抗は荷重に比例する。しかし、荷重が大きくなると荷重の増大の割には真の接触面は増大しない。その結果、上に凸の曲線が得られるとも解釈できる。

Bowdenらが単結晶氷を用いた摩擦試験を行って、対馬が後に明らかにした氷の結晶面による摩擦の異方性を知っていたなら、摩擦融解を主張できたかどうか疑問である。

10. 小林らや対馬らの競技用スケートの摩擦試験ではBowdenらの得た動摩擦係数より一桁小さい0.005という動摩擦係数が得られた。そして、氷の結晶面による摩擦の異方性も確認された。摩擦融解説では摩擦抵抗から発生する摩擦熱が氷の融解の熱源となる。摩擦係数が小さくなれば発生する水も少なくなり、さらに摩擦係数が小さくなれば、もはや氷を溶かすほどの熱の発生は存在しなくなる。水がなければ摩擦は大きくなるはずである。これは摩擦を小さくしていけば、摩擦が逆に大きくなるという矛盾した学説である。対馬らの高速スケートリンクでは、とけ水が介在しないから、氷の結晶面

を変えることで氷の結晶面の性質が反映され摩擦係数をさらに小さくできたと解釈される。

Bowden が氷の摩擦を調べた 1939 年には氷の硬さの値も不明で、氷が粘弾性体であること、つまり、真の接触面積が接触時間の関数になるということも分かっていなかったし、氷と異物の接触面、氷同士の接触面で焼結が起こり、真の接触面積が時間とともに拡大することも知られていなかった。氷上の滑りに密接な関係を持つ氷と異物の間の付着強さ、氷の剪断強さの値も不明であった。

氷の特異性は上に挙げたどの場合にも現れ、今日では氷の摩擦の説明は Bowden の考えたほど単純ではないことが明らかになった。

もともと摩擦融解説は十分吟味されて導かれた結果とは言い難い。論文に明記されているようにもし氷が溶けるとすれば、それは圧力が原因ではなく、摩擦熱が原因で溶けることを主張したものである。スキーマの滑る理由として摩擦融解・水潤滑を採用するに当たっては他の可能性も検討する必要があるといえる。

### 18.3 Evans, Nye and Cheeseman (1976) 論文の吟味

Evans ら (1976) は水平軸の周りに回転する氷円柱表面に刻んだ V 型溝に逆 V の字に組んだ丸棒スライダを滑らせた。その結果の大部分ははすでに記述したが、Evans らはあまり重要視しなかった「真の接触面積の見積もり」に関する貴重な結果がある。真の接触面積を見積もるために真鍮および PMMA の各スライダーに煤をつけた。荷重  $W=4.5\text{N}$ 、摩擦速度  $V=1\text{m/s}$ 、摩擦による煤の変色域(図 131) から真の接触面積を見積もり、水膜厚さについて定量的議論を行った。真鍮面について得られた結果は、

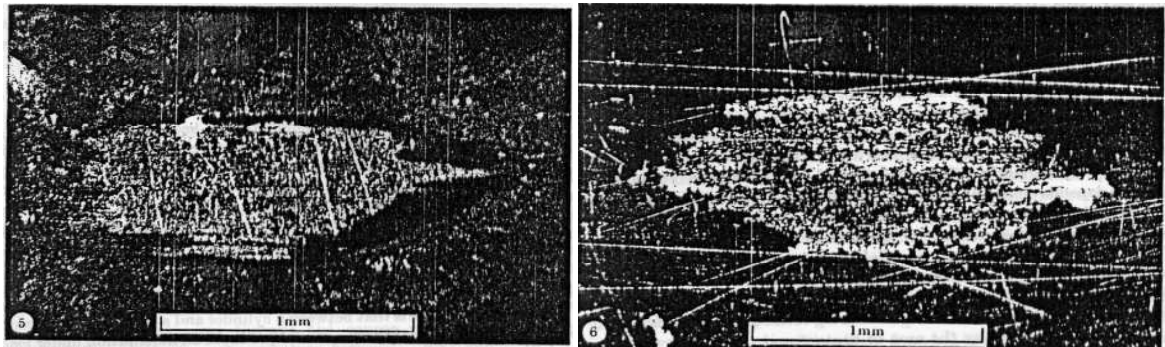


図 131 Evans らによる真の接触面の測定(左：真鍮スライダー，右：PMMA スライダー)

真の接触面積  $A=0.75\text{mm}^2$

動摩擦係数  $\mu =0.02\sim0.08$

摩擦抵抗  $F=0.9\sim3.6\text{N}$

であった。したがって、Evans らは計算しなかったけれども剪断強さの値  $S$  を求めてみると

真の接触面の圧力  $P=W/A=60\text{MPa}$

真の接触面の剪断強さ  $S=F/A=1\sim5\text{MPa}$

が得られる。Evans らの測定から計算される真の接触面の剪断強さ  $S$  の値は氷の剪断強

さと同程度あるいはそれ以上の大きい値を与えていて、摩擦の測定結果が凝着説で説明が可能だったことになる。しかし、Evansらは水潤滑という先入観から脱しきれなかったためにSの値を示さず、水潤滑を仮定して水膜厚さ4nmを導いた。しかし、これほど薄いと水潤滑は難しいと判断し、境界摩擦と流体摩擦の混合摩擦から構成されていると一度は考えた。その一方で水潤滑にこだわりすぎたことから、矛盾した推論を行っている。つまり、氷表面のV型溝の摩擦による摩擦が氷の融解によって生じたと仮定し、流体潤滑の厚さとしてより妥当性の高いと思われる0.3 $\mu\text{m}$ を水膜厚さとして導いたことである。真の接触面積は0.75 $\text{mm}^2$ から変わりようがないのだから、水膜厚さを厚くすればますます流体潤滑から生ずる抵抗は小さくなり、摩擦抵抗実測値の説明が難しくなるはずである。氷は塑性変形しやすい物質であり、塑性変形やスライダの突起部による摩擦でV型溝の摩擦を説明できる可能性が検討されなかった。以上の検討から導かれる結論は4nmの水膜厚さから生ずる流体摩擦の抵抗は水の介在しない乾燥摩擦値と等価になるということである。言いかえると、水膜厚さとして4nm程度が導かれるということは純粋の氷自体の剪断の摩擦(乾燥摩擦)になっているということである。

次いで、Evansらは熱解析理論を構築し、摩擦係数 $\mu$ が温度T( $^{\circ}\text{C}$ )に比例し、速度Vに反比例(高速域)する項と $V^{-1/2}$ に比例(低速域)する項の和で表される関係式を導いた。熱解析はその後Evansらが不合理と考えた4nm程度の水膜を逆に採用して多点接触の場合などに展開されていった。Evansらは理論解析を実験結果の速度特性、温度特性に適合できたことから、熱解析の妥当性を水潤滑の妥当性として主張した。しかし、この論理解釈に関しては重大な問題がある。つまり、どんな摩擦機構であろうと、摩擦エネルギーの殆ど全部が熱エネルギーに変わるものである。このことに着目するなら、熱解析が実験結果に適合できたからといっても、それが摩擦融解・水潤滑だけを支持するとは限らないという視点が見落とされていたことになる。前にも指摘したように、そもそも水膜厚さ4nmが導かれるというのは凝着摩擦を意味している。凝着説の立場にたった場合であっても、摩擦エネルギーのほとんど全てが熱エネルギーに変換されるのであって、熱解析の結果が当てはまると考えられる。

Evansらの熱解析理論は根本的な解釈の修正が行われることなく問題を内包したまま、その後、多点接触に拡張したOksanen & Keinonen(1982)、あるいはAkkok, Mc Ettles & Calabrese(1987)らにより発展させられる。

#### 18.4 Oksanen & Keinonen(1982)の論文の吟味

Oksanen & Keinonen(1982)はEvansら(1976)の熱解析理論を多点接触に拡張した。Oksanenらは荷重 $W=11.35\text{N}$ 、速度 $V=1\text{m/s}$ で摩擦係数 $\mu=0.02$ を得た。氷の硬さを $H=45\text{MPa}$ としているので、真の接触面積の総和は $A=W/H=0.25 \times 10^{-6}\text{m}^2$ である。

摩擦抵抗が厚さ $d$ の水膜の粘性(粘性係数 $\eta=1.8 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ )から発生していると仮定すると、

$$F=0.23\text{N}=\eta(V/d)A=0.4 \times 10^{-9}/d$$

より、 $d=2\text{nm}$ を得る。この厚さはあまりに薄すぎて流体潤滑が実現しているとは考えられない。この場合もOksanenらは計算していないが、真の接触面の剪断強さSを求めれば



$$S=F/A=0.9\text{MPa}$$

が得られる。これは氷の剪断強さと同じ値であり、凝着の摩擦になっていると解釈できる。Oksanen らの論文の吟味から得られる結論は、熱解析の結果を実験結果に適合できたことから、氷の低摩擦は摩擦融解・水潤滑によるとした Oksanen らの結論は凝着説で説明可能な値だったことになる。たとえ融け水が関与したとしても、その水による摩擦の低下は認められないということになり、低摩擦と水潤滑を結びつけることができない。Oksanen らもまた伝統的な摩擦融解・水潤滑にこだわりすぎたために摩擦の本質を見失ったといえよう。

### 18.5 藤岡の論文の吟味

藤岡は底面積  $6\text{cm}^2$  の雪ブロック (雪密度  $340\text{kg/m}^3$ ) を回転するガラス円板上に 5 分間 ( $-4\text{ }^\circ\text{C}$ , 滑走距離  $20.7\text{m}$ ) 滑らせた。ガラス面を通して観察された真の接触面は 190 個であった。

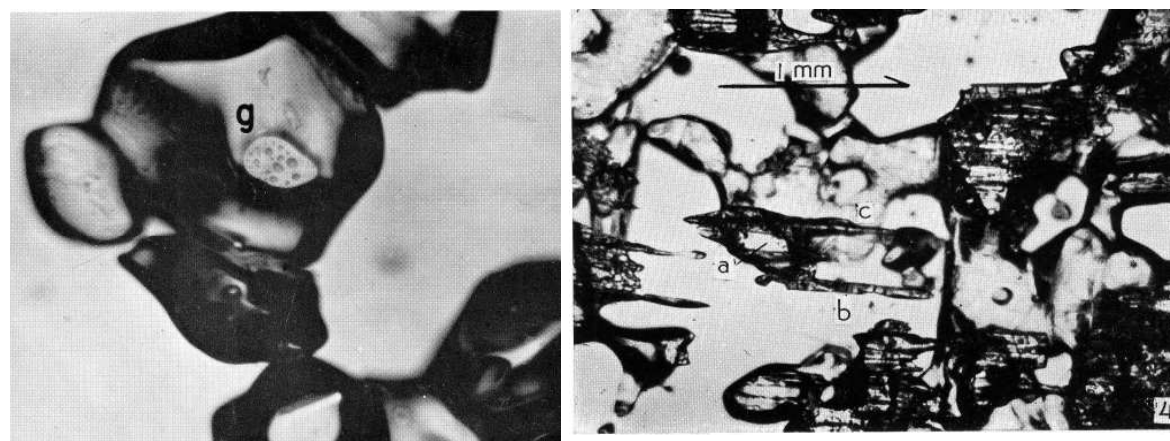


図 132 左：ガラス面と雪ブロックの摩擦面，動摩擦係数  $\mu = 0.36$  (藤岡,1962)  
右：アクリル面と雪ブロックの摩擦面， $\mu = 0.7$  (藤岡,1963)

摩擦速度  $V=0.069\text{m/s}$

荷重  $W=2.73\text{N}$

摩擦抵抗  $F=0.98\text{N}$ , 摩擦係数  $\mu = 0.36$

真の接触面積  $A=8.35\text{mm}^2$

滑らせずに単に 5 分間荷重を加えた場合には、真の接触面は 10 分の 1 に減少した。アクリル板上の滑りでは摩擦係数が 0.7 程度と大きく、図のようにつららが発生した。ガラス面に対する真の接触面の圧力は  $0.3\text{MPa}$  にすぎない。この場合、 $20.7\text{m}$  の滑走中に融解や摩擦等によって徐々に真の接触面積が増大した結果と考えられる。真の接触部のガラス面と雪粒先端の間に毛管負圧が働き、雪粒先端は密着しながらガラス面上を滑っていったと推測される。このような密着性も雪の摩擦の特長といえる。一方、摩擦の小さい材料面上を滑った場合には、雪粒先端に平滑面が現れるだけであった。この観察は摩擦の大きいときに発生する水も多く、逆に、摩擦の小さいときには発熱が少なく、水が発生しない場合のあることを示していて、すでに指摘した摩擦融解・水潤滑説の論理的矛盾を実験により裏づけたものと解釈できる。それゆえ、藤岡 (1963) は融解の明瞭な証拠を得たにも

かわらず、雪の低摩擦機構としては摩擦融解・水潤滑に賛同しなかった。むしろ、 $-20^{\circ}\text{C}$ の低温でもスライダー (PMMA) が雪面に硬く固着した観察から低温癒着が摩擦の本質であろうと指摘している。ところで、上の  $0.98\text{N}$  の摩擦抵抗が水膜の粘性抵抗であるとすると、水膜厚さ  $d$  はわずか  $1\text{nm}$  という薄いものになってしまう。こんなに薄い水膜が実在しえるのか疑わしい。一方、真の接触面の剪断強さ  $S$  は  $0.12\text{MPa}$  となり、ガラスと氷の付着強さとして妥当な値となる。アクリル (PMMA) 面と雪塊の摩擦でツララが認められたことは真の接触部の雪粒先端が融けて再凍結したものであることに疑問をはさむ余地はないが、そのときの界面剪断強さは水が介在しないとしたときの付着強さの値と同程度の値であると推定され、凝着説で説明できる値である。つまり融け水は介在したが、その水が摩擦を減らす潤滑作用をしたとは認め難い。摩擦機構として水潤滑を主張するためには、介在すると想定される水が摩擦を低下させることが示されなければならない。藤岡はその効果を検出できなかったことから、水潤滑説に賛同しなかったのである。

### 18.6 水潤滑の摩擦

水の関与した摩擦の測定は藤岡や対馬の結果が示すように摩擦の低下を伴っていなかった。つまり、水が介在しても水による潤滑効果が認められなかったのである。水潤滑の検討には真の接触面積と水膜厚さがセットで明らかにされる必要があるが、通常の摩擦測定では未だ理想的な測定は報告されていないようである。この問題に対する解決の糸口が復氷実験からもたらされた。

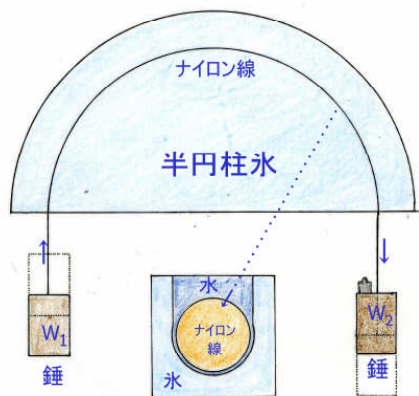


図 133 復氷と滑り

復氷の実験法の一つに図 133 に示すように半円柱氷にワイヤーをかけそのワイヤーの両端に等しい質量の錘  $W$  を吊してワイヤーを氷の中に貫入させる方法がある。復氷実験はプラスの気温の環境下で行われる。当然試料氷は表面からゆっくりと融けていくわけであるが、金属線ワイヤーの通過面は再び氷で埋まり、ワイヤー通過後も氷は二つに割れない。ワイヤーの下面は吊り下げられた錘の影響を受けて融点降下を起こし、したがって、周囲との温度差に伴う熱の流入があり、その熱でワイヤー下面の氷が融けワイヤーは貫入すると解釈されている。外部に冷却源がないのにワイヤーの通過面が氷で埋め戻されることに不思議さがあり、融け水が氷に戻ることから「復氷」と呼ばれ多くの科学者の興味を引きつけてきたものである。

ところで、ワイヤーとして熱伝導の悪いナイロン線が使われる場合、復氷が部分的にしか発生せずワイヤーの通過面には水が板状に残ることが知れている (Drake & Shreve, 1976)。ワイヤー下面では氷とナイロン線の間に一様な厚さの水膜が介在するとされているので、ワイヤーを引いている錘の一方にごく小さい質量の錘を追加すれば、ナイロン線は水に浮いた状態で錘の方に滑る。この場合、ワイヤーは水膜内に浮いているから、このワイヤーに滑り運動を行わせれば水潤滑の摩擦を実現できると考えられる。ワイヤーと氷の間に挟まれた水は常にワイヤーの下面から後面 (上面) に向かって流れている。水膜は

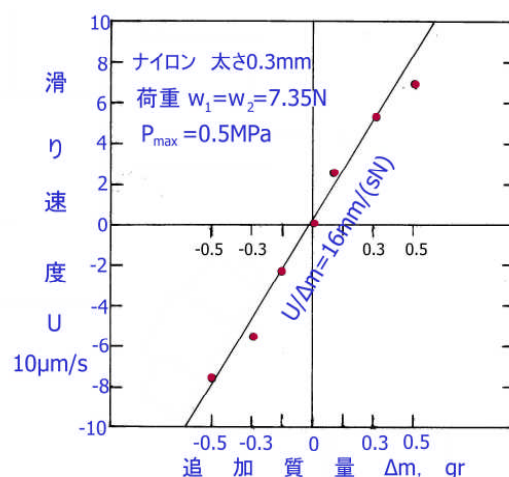
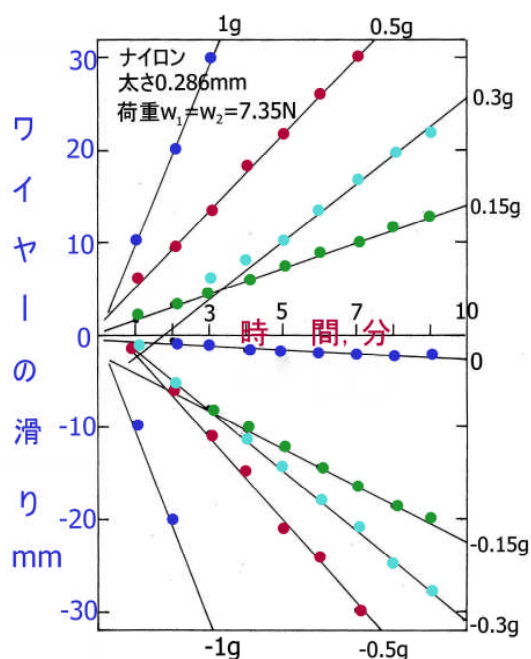


図 135 ワイヤーの滑り速度と追加質量との関係

図 134 ワイヤーの滑りと追加質量の関係

薄いうえ氷と異物との間に挟まれて流れるという特殊な条件にあるからバルクの水の粘性係数とは異なることも考えられる。復氷過程における水膜厚さと粘性係数を同時に決定するため、対馬(2012)は通常の復氷速度測定に加え上に述べた復氷中のワイヤーを滑らせる実験を行ったのである。ワイヤーの滑り速度は一定で(図 134)、速度の大きさは追加した錘の質量に比例した(図 135)。この場合、ナイロン線ワイヤーの滑りは水潤滑の滑りになっていて、摩擦係数は速度に比例して増大することになる(表 6)。流体摩擦では摩擦係数は速度に比例するのだから、摩擦係数が一義的には定まるものではない。

表 26 ナイロン線 太さ 0.3mm, 半円を描いたワイヤーの直径 140mm, 全荷重 14.7N

追加錘の質量, g	0.15g	0.3g	0.5g	1g
摩擦係数	0.0001	0.0002	0.0003	0.0007
滑り速度, μm/s	30	55	77	170

これら摩擦係数の値は 1 万分の 1 のオーダーであり、従来のスピードスケートの摩擦係数よりさらに 1 桁小さく、通常の氷の摩擦係数 0.04 程度に比べると 2 桁も小さな値であることが注目される。

#### ワイヤー下面の水膜厚さ $d$ と水膜の粘性係数 $\eta$ の決定

従来の復氷の研究では  $d$  と  $\eta$  の同時決定は出来なかったので、水膜の粘性係数はバルクの水の粘性係数  $\eta$  ( $1.7 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ) に等しいとしてワイヤーの貫入速度  $V$  や水膜厚さ  $d$  が議論されてきた。しかし、 $1\mu\text{m}$  内外の隙間を流れる氷の融け水 ( $0^\circ\text{C}$ ) の場合水分子の一部はクラスター化しているので、水の粘性係数はバルクの値よりより大きい可能性が考えられる。 $d$  と  $\eta$  はそれぞれ独立には決定できないので、 $d$  と  $\eta$  を含む二つの関係式を連立させて求めることになる。

関係式の一つは Ornstein が復氷理論から導いた

$$V = fd^3 P_{\max} / (12 \eta a^2) \quad f = \sigma_w / \sigma_i \quad (18.1)$$

であり、 $\sigma_w$  は水の密度、 $\sigma_i$  は氷の密度、 $P_{\max}$  はワイヤーが氷に加える最大圧力、 $a$  はワイヤーの半径である。図 133 の実験ではワイヤーにつり下がっている左右の錘を  $W_1 = W_2 = W$ 、ワイヤー間距離を  $D$  とすると、

$$P_{\max} = 4W / (\pi aD)$$

の関係がある。

もう一つの関係式は本節で述べた復氷過程でワイヤーを滑らせたときの摩擦（摩擦抵抗  $F$ ）から導かれ、ワイヤーの滑り速度を  $U$ 、ワイヤー下面と氷の接触面積を  $A$  とすると

$$F = \eta (U/d) A \quad A = \pi^2 aD/2 \quad (18.2)$$

である。

式 (18.1) と式 (18.2) に次の実験値を入れて

$D = 0.14\text{m}$ ,  $A = 1.04 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ,  $a = 0.15 \times 10^{-3}\text{m}$ ,  $P_{\max} = 0.5 \times 10^6\text{Pa}$ ,  $V = 1.2 \times 10^{-6}\text{m/s}$

$$d^3 = 0.59 \eta$$

$$\eta = 0.6 \times 10^6 d$$

を得るので、

$$d = 0.6 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$\eta = 0.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

と水膜厚さ  $d$  と水膜の粘性係数  $\eta$  が決定される。

水膜の粘性係数はバルクの値の 235 倍も大きい。

## 19. 摩擦の関与する諸問題

### (1) 冬靴の問題

雪国では雪の無いときと、雪のあるときで靴をはき替える。夏の革靴は雪の上では摩擦が大変小さく、滑り過ぎて危険であり、歩行が容易でない。特に、氷化した道は滑り過ぎて危険である。そのため、雪道で摩擦の大きいゴム底の靴等にはき替えるのである。スパイクのついた靴もある。

### (2) 温室の屋根や傘に積もる雪の問題

温室のビニルシートは強度が大変弱い。それゆえ、多量の雪がシートの上に乗ることは危険である。シートと雪の摩擦を小さくする工夫や膜の内側から振動を与えるなど、雪が自重などで滑り落ちるように工夫して、シートに大きな雪荷重が加わらないようにすることが肝要である。

北陸のような暖地においては冬中傘を手放すことは出来ない。傘に付く雪の荷重は以外に重いもので、ずっしりとた重みが腕に加わる。たとえば、半径 0.75m の傘に厚さ 0.02m (=2cm) の雪が積もったとしよう。積雪の密度を  $200\text{kg/m}^3$  とすると、雪の荷重は 70N (=7kg) もの大きさに達する。

温室の屋根や傘に積もった雪は薄い積雪の段階から小さな振動や衝撃で容易に滑り落ちることが望まれる。この滑りは摩擦そのものの問題である。

### (3) 飛行船における雪の問題

飛行船は船体の長さが 50m もあり、機体を膨らませているヘリウムガスと空気との密度差から生ずる浮力を利用して浮いている。飛行船は機体が大き過ぎるために格納庫に収められるとは限らず、屋外に係留されるが多い。このとき、飛行船の屋根（背）に当たる部分に雪が積もると重心が高くなり、重心が浮力の中心より高くなると飛行船は不安定になり転覆の危険が生ずる。ここでも、如何に少ない積雪の段階から雪を滑り落とすかが問題とされている。

### (4) 自動車のスリップと安全走行の問題

雪道での走行では摩擦が小さいことと、路面状態が極めて不均一になることから車輪毎に摩擦の大きさが異なり、自動車の走行は極めて危険になる。安全走行を獲得するために、路面管理といかに摩擦の大きいタイヤを開発するかが問題とされている。

氷化した路面に威力を発揮したスパイクタイヤが雪のない路面で粉塵公害という問題（健康被害）を引き起こし、使用禁止となった。氷雪路面でも安心して走れる（摩擦の大きい）安全なタイヤの開発がなされないままの使用禁止であり、積雪寒冷地の交通に深刻な問題を提起している。

### (5) スコップ、スノーダンプによる除雪の問題

地面に近い方に位置する雪が水を含み、その上に温度の低い冷たい雪が重なっているようなとき、雪がスコップなどに強く付着し、除雪に難渋することがある。これも摩擦の問題である。

スコップの表面にワックスやロウを塗ると、雪の滑りが良くなって、除雪が容易になることはよく経験する。科学技術が進歩しても、身近なスコップに不便を感じず。そこにビジネスチャンスを見出す人が出て欲しいものである。

### (6) 機関車のプラウによる除雪の問題

豪雪地帯の冬の線路を走る電車や気動車は雪の樋を走るようなものである。気温が低く雪が乾いていれば、プウラは雪を跳ね飛ばし雪煙を上げて走行する。しかし、湿った雪になると雪は舞い上がることなく車両に押されて線路の上を滑るように移動していく。滑りながら雪は硬さを増し、新しい雪を集めて大きく強固な雪の塊り（これを持ち込み雪という）に変わっていく。無駄な雪の塊を押していくために余分なエネルギーを消費し、最悪の場合、この持ち込み雪によりポイントが切り替えられ、車両の脱線にいたることもある。



図 131 ロータリー除雪車

このほか車輪のフランジ（つば）によって雪が次々に圧縮される結果、レールの内側に硬い氷のような雪が形成され、車輪がこの雪にのし上がって脱輪することもある。

#### (7) 滑走路における摩擦の問題

自動車の摩擦と同様の問題が飛行機の車輪と滑走路の間にも生ずる。特に、滑走路から誘道路へ移行するコーナ部でのスリップと脱輪、スノージャム状態の雪におけるハイドロプレーニング現象も問題とされている。



図 129 大型プラウによる空港除雪

#### (8) 砕氷船の問題

海氷域を航行する船舶には海氷・流氷と船腹との摩擦の問題がある。この氷との摩擦に費やされるエネルギー消費は航海エネルギーの2割にも達するという報告もある。薄く張った氷海を船舶が一度航行するだけで、船腹の塗料は摩耗し、露出した鉄の表面も磨かれて、ピカピカの面が露出するということを海氷研究の権威田畑忠司先生から聞いたことがある。



図 130 南極観測船（砕氷船）

海氷に摩耗されないような強力な塗料で氷に対する摩擦も小さい塗料（たとえば、イナータ 160）も開発されている。特に、砕氷船は厚い氷に覆われた海を航行することが多いので摩擦に対する対策は重要である。南極観測船「しらせ」にもイナータ 160 が塗られている。

#### (9) 石油掘削塔、海洋構造物における摩擦の問題

海底の地層の中からも石油が掘削されている。そのため、海上に100m四方もある大きなベースが設けられ、海底に打ち込まれた橋脚に支えられている。冬になって海に氷が張り、流氷が押し寄せてくると、それらの氷が橋脚を水平方向に押し曲げる力を及ぼす。数10mの長さの橋脚の先端に水平力が働けば、橋脚は小さな力でたわみ、あるいは崩壊に至るであろう。



図 131 氷海の石油掘削塔

実際に、強大な橋脚等が氷の力で破壊されてきた。氷から橋脚塔を守るために橋脚塔を円柱状ではなく円錐状にして、押し寄せてくる氷が橋脚の斜面をはい登るように工夫され

る。登るにつれ氷には曲げの力が作用して氷が細かく壊れていくので橋脚には大きな力が作用できなくなるのである。

同様に、大きな河川にかかる橋の橋脚や灯台なども流水に破壊されることがあるので、円錐型橋脚の導入などによって被害の軽減が測られている。

ここでは氷に曲げ破壊をうまく発生させて、氷によって加わる強大な力を弱めている。橋脚斜面（表面）の摩擦を小さくするほど効果的なので、表面に低摩擦の塗料が塗られる。

#### (10) 氷上軌道

中国の明の十三陵の建設に当り、大理石の運搬に氷の軌道を利用したと言われる。次世代の新幹線として期待されているリニアモーターカーのプラットフォームを氷の軌道にすることも考えられた。氷は滑り摩擦が小さく、たとえ破損しても修理が容易であるという利点がある。

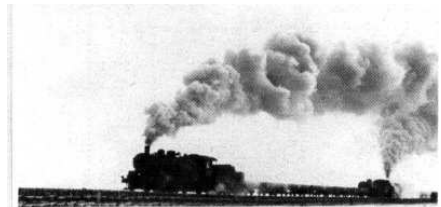


図 132 氷上軌道（松花江上）

新潟大学の松野教授は氷の摩擦の小さいことに注目して氷の軌道の上に自動車を走らせる試験を行った。夏は軌道を冷やしながらか車の運転を行う。軌道は3線になっていて、中央のコンクリートの駆動路を駆動輪が移動し、両側の氷の路面を轡が走行する。氷の摩擦の小さいことを利用して少ないエネルギーで物を移動できる。

## 20. 回転体と試験片の摩擦

円筒状氷を自由回転させ、この回転する氷の円周面に試験片を押しつけて摩擦を行う。氷の回転は摩擦により、徐々に遅くなり、遂に停止する。はじめは大型旋盤のチャックに挟まれた氷円柱をバイトで仕上げ、その上に試験片を接触させて、摩擦の測定を試みた。

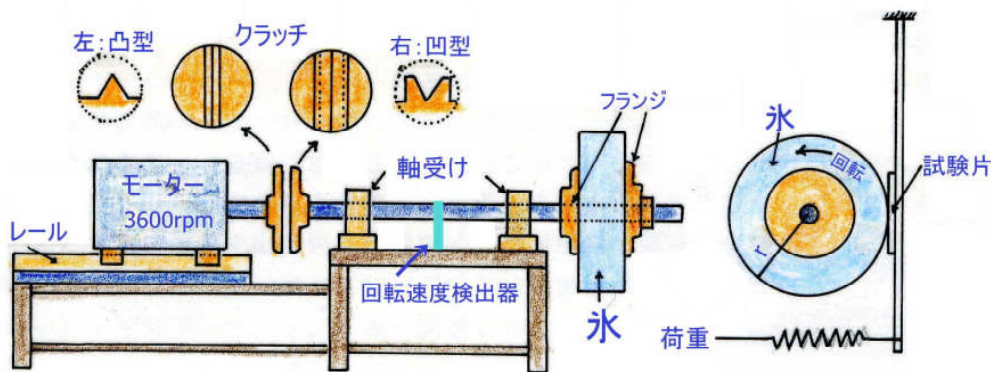


図 136 高速摩擦の実験装置（図解）

その後、ボブスレー競技のような秒速 30m を越える高速の摩擦を行うため、3600rpm の高速回転モーターで氷円柱を回転させ、最高速度に達したところでモーターを切り離し、摩擦がブレーキとなって回転の停止時間が短くなることに着目して、摩擦係数を決定する方式を試みた。

摩擦を行わないときの回転体の運動方程式は、試料系の慣性モーメントを  $I$ 、回転の角度を  $\theta$ 、ベアリング（軸受け）等の抵抗モーメントを  $R_1$  として

$$I d^2 \theta / dt^2 = - R_1$$

である。

時間  $t=0$  での角速度を  $\omega_0$ 、制動停止時間を  $T_0$  とすると、

$$R_1 = \omega I / T_0$$

摩擦を行ったときの運動方程式は、試験片と氷の摩擦抵抗のモーメントを  $R_2$  として、

$$I d^2 \theta / dt^2 = - (R_1 + R_2)$$

試験片と氷の摩擦係数を  $\mu$ 、氷の半径を  $r_0$ 、試験片を氷に押しつける力を  $F$  とすると、

$$R_2 = \mu r_0 F$$

となる。

したがって、摩擦係数  $\mu$  は停止時間を  $T$  として、

$$\mu = R_2 / r_0 F = (\omega_0 I / r_0 F) [(1/T_0) - (1/T)]$$

と求まる。

$$\text{慣性モーメント} = \int r^2 dm = \int_{r_1}^{r_2} r^2 (2h) dr = m [r_1^2 + r_2^2] / 2$$

シャフト	3396gr-cm <sup>2</sup>	大円柱氷	76429
ワッシャ	72	総計	1.43 × 10 <sup>5</sup>
ナット	419	モーター	100V, 200W, 3600rpm
小円板	1985	小円板外径	半径 0.1m
中円板	3663	最大線速度	30m/s
大円板	15488	コミュテーター	3703

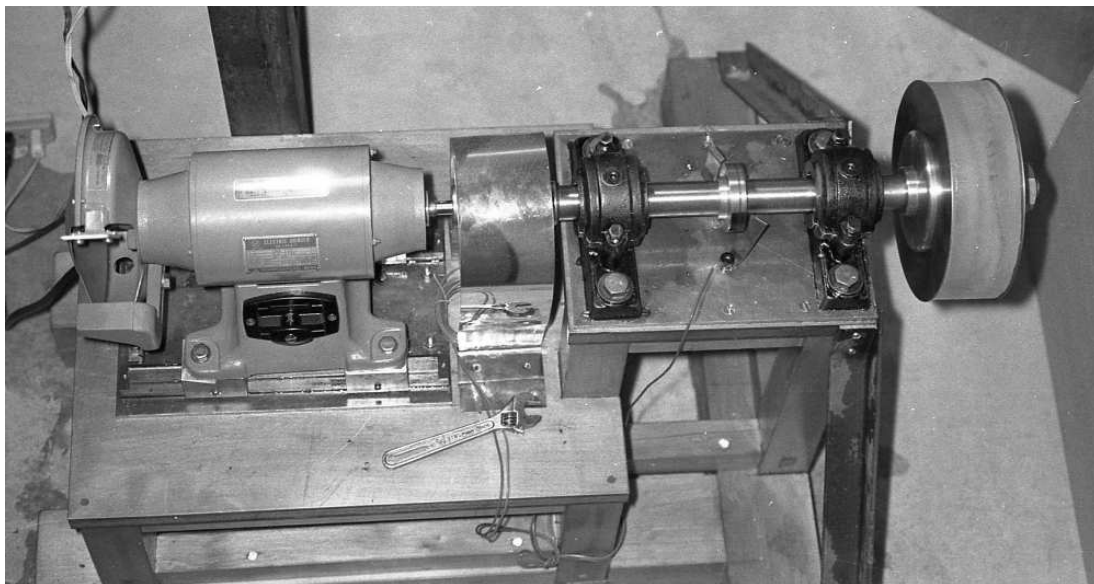


図 137 氷の高速摩擦の実験装置（写真）

上の写真は回転体と試験片の摩擦装置である。右端に氷試料があり、氷は左右の真鍮の円板に凍着されている。回転軸は二個のベアリングで支持され、ベアリングの中間に回転速度を電氣的に検出するセンサーがついている。左端のモーターはグラインダー用の高速



回転 3600rpm モーターで、二本の平行なレールの上をスライドできる。モーターを試料のついた回転軸はクラッチで連結されている。クラッチは中央のカバーに隠れて見えない。摩擦試験片も写真には写っていない。

試験片は鉛直の板に固定されている。この板の上端は蝶番(チョウツガイ)で支持棒につながれている。鉛直な板の下端にはフックがあり、フックから伸びた糸は滑車を通して錘につながれている。

氷の回転が始まると、試験片は激しく振動するようになった。氷の摩擦面は旋盤で仕上げられているが、摩擦装置に取り付ける際に中心軸がわずかにずれても、氷試料は偏心して回転することになり、振動の発生源となる。

試験片が摩擦面に対して垂直に振動すると、氷に衝撃力が加わり、氷表面にクラックが発生する。これらも、精密な摩擦測定の問題となった。

以上のような測定上の問題を克服する目的で、旋盤のチャックに挟んで仕上げた氷を、装着状態で滑走体と摩擦力測定装置をセットした摩擦測定も試みた。その装置を参考までに示しておく。

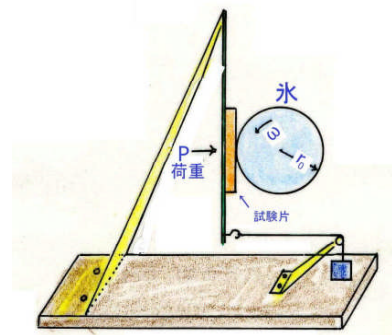


図 138 摩擦方法

## 2.1. 札幌冬季オリンピック (1972 年) から長野オリンピック (1998 年) へ

(なぜ日本は絶好の機会を生かせなかったか)

1972 年札幌冬季オリンピックの時代、日本人は欧米外国人に対して劣等感を抱いていた。なにしろ、日本はまだ発展途上にあり、豊かではなかったし、自由に海外旅行のできる状況にはなかった。当時は国際会議出席は制限され、限られた教授が日本国代表として参加している状態であった。

そんな時代だから、オリンピックの開催に当たって、ともかく、諸外国から不評を受けないように心がけた。たとえば、「日本のスキーコースは雪質が最悪だ」とか、「スケートリンクの氷のすべりが悪い」などと指摘されることを最も恐れた。その対策として、国際大会の経験のある選手やコーチから「どういう雪のコースがいいのか」、どういう氷のリンクがいいのかアドバイスをうけ、良いと言われたコースの雪質を科学的に調査して、同種の性能を持つ雪のコースを実現しようとした。スケートリンクではどういう水質の氷がいいか、氷温を何度か調整するのがいいかが探求課題となった。

実際のコース作りには次ページの記録写真に見るように、山での雪の移動、広大なスキーコース上の雪の踏み固め、急峻な斜面上ではザイルで身の安全を確保したコース作り、同様に硬い急峻斜面上でのアイゼンをつけてのコース作り、水を吹きつけながら雪を貼り付けていくコース作りなど、人海戦術による涙ぐましまでの努力が重ねられた。そこには、日本で開催される競技は日本式でいいんだという大会関係者のプライドなど全く入り込む余地はなかった。

プレレオリンピック、プレオリンピックと本番前の二冬の試行を経て本番に望んだの

である。このオリンピックに対して北海道大学低温科学研究所はコースの科学調査，コース作り，製氷の全般にアドバイスした。スキーコースの雪質は木下式硬度計で  $10^6\text{Pa}$  ( $10\text{kgf/cm}^2$ )以上が目標とされた。スピードスケートでは科学研究の結論として $-2 \sim -3^\circ\text{C}$ の氷温を最適とする指針も出された。(注：この指針は世界新記録続出となった 2002 年ソルトレーク大会の短距離 $-7^\circ\text{C}$ ，長距離 $-12^\circ\text{C}$ からは著しくかけ離れていた。)

オリンピック本番では，ジャンプ競技における日の丸飛行隊の活躍が日本中を湧かせ，国民に誇りを与えてくれた。

札幌オリンピックの科学調査の記録は日立製作所の応援で出版された。

札幌オリンピックから 26 年後の 1998 年，日本で二度目の冬季オリンピックとして長野大会が開催された。この間，海外旅行や仕事で海外へ出ていく人が膨大な数に登り，もはや，かつてのような外国人に対する劣等感は消えていた。そこには日本式でいいんだという誇りさえあった。高度経済成長を果たした日本の威信がスピードスケート会場，フィギュアスケート会場，リュージュやボブスレー会場，ジャンプ台など建造物に注がれた。そこにははっきりとした日本人の誇りがあった。

国内のオリンピック誘致に名乗りを上げた地域の中から，長野が選考され，同時に国の支持を受けるようになる。国際 JOC 総会での開催地選定投票には国民の熱烈な期待が寄せられた。長野に決定した瞬間，日本中が熱狂的祝賀ムードとなったものである。このとき，開催地の誰が「国際社会に対する日本という重い責任」を背負うことになったと自覚したのであろうか？競技施設の建設，選手や観客のスムーズな移動，ミスのない大会運営など，どこの国の大会にも共通な最低限の義務の遂行が念頭にあったと思われる。



スキーコースへの手渡しによる雪の運搬



コース上の雪の踏み固め



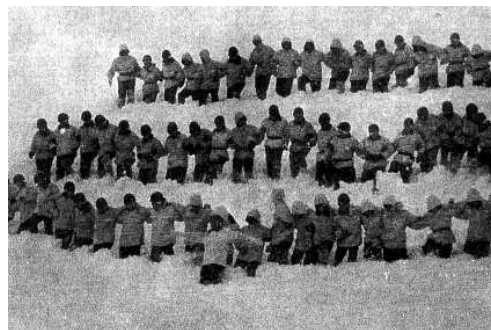
浪板の樋を利用した雪の輸送



雪の張り付け



手渡しによる雪の運搬



人海戦術によるコース上の雪の踏み固め



図 139 対岸から筒による雪の輸送

風の強い部分では雪が吹き飛ばされるので、水を吹き付けながら貼り付けた。



スキージャンプコースへの雪の輸送



ランディングバーンのコース作り



リュージュコース作り

ジャンプの急な斜面の雪の張り付け



リージュコース（氷の樋）

滑り止めにアイゼンをつけての危険な作業



図 140

急傾斜のジャンプ競技場の雪のコースはザイルによる安全確保やアイゼンをつけての作業であった。

開催地、大会関係者の一体誰が「**オリンピック誘致が同時にその国の知性が試される**という重い責任が付随していた」ことを認識していたのであろうか？結論から先に言うと、オリンピック開催を通して「日本は大した国民ではない、尊敬に値する国民とは言われない」と暗黙の烙印を押された。自らの無能・恥をさらした大会と言えなくもない。その証拠に歴代の記録が競われるスピードスケート界において、重要な競技会が長野に誘致されることがない。ワールドカップ短距離大会がシーズン初めの12月に開催されても喜べない。12月は選手の調整段階であり、記録を狙う大会とは位置づけられないからである。極端な言い方が許されるなら、「エムウェーブは1998年オリンピック終了と同時に廃墟」と化したのである。日本は337億円もの巨費を投じた壮大な建造物「エムウェーブ」が国際競技会場としては価値のないさらしものになっていることを自覚すべきであろう。エムウェーブのわずか8分の1の建設費のソルトレークシティ五輪オーバル（総工費40億円）は高さ17m、エムウェーブの高さ43mに比べたら雲泥の差だ。要は外見にこだわって本質をないがしろにするか、本質追究かの違いであり、知性の違いともいえよう。

大会誘致の持つ重い責任とは以上のことである。2006年トリノオリンピックは極言すればイタリア人あるいはヨーロッパの恥さらしの大会である。世界新記録のでないオリンピック大会に対して、国際社会は「イタリア人は知恵がない、選手からチャンスを奪った」と判定するわけである。スピードスケート界でイタリア人が尊敬を得ることにはつながらない。

歴代の記録が競われる唯一の競技がスピードスケート競技であり、世界中の製氷担当者がよりよい記録が出る氷作りに鎬を削ってきた。オリンピックで世界新記録が出れば、世

界中が歓喜する。逆に、一つの世界新記録も出なければ、低調な大会に終わる。さて、わたくしが何故、こうもくどくどと記録にこだわるのかといえば、記録を左右する二つの条件があるのだが、国民の知性はまだそのことをはっきりと認識するに至っていないからである。一つは言うまでもなく「氷質」であり、札幌オリンピックでも問題とされたし、どこの競技会でも注意が払われてきた。ただし、コーナーで加速できる氷質調整となれば21世紀の新しい課題であろう。もう一つは「**空気抵抗**」である。実はこの空気抵抗がタイムに決定的影響を持つ。しかし、このことが国民の知性として定着している開催地が少ない。カナダ（カルガリー）とアメリカ（ソルトレーク）は偶然地理的条件に恵まれていた。両国の知性なのか、偶然なのか、判別しかねる所がある。2010年バンクーバー大会がカナダの真価が問われる重要な大会になるであろう。滑走する選手の受ける空気抵抗は速度の二乗に比例し、空気密度に比例する。標高の高い高地ほど空気が薄く、空気密度が小さいから、選手の受ける抵抗が少ない。しかも、この空気抵抗はスケートと氷の間の摩擦抵抗に比べ桁違いに大きい。この点に気づき、山頂にリンクを建設するとか、高地がない場合には人為的に気圧を調整する減圧リンクを実現する国民こそ、知性に優れた国民であり、国際社会から真に尊敬されるにふさわしい国になるであろう。バンクーバーオリンピックはカーリング女子で日本勢の活躍で盛り上がったが、肝心のスピードスケートは低調でバンクーバー大会はカルガリーのオーバル室内リンクが偶然の地理的産物に過ぎなかったことを立証するものとなった。

減圧リンクの圧力は大気圧より7%程度減少するに過ぎない。しかし、建造物は大きいから、建物全体が受ける力は巨大になる。屋根雪なら2m以上も積もった場合に相当する荷重を受ける。面積4万 $m^2$ とすると、約3万トンの力が加わることになる。そのような強力な建造物が必要になるわけだが、新テクノロジーへの挑戦こそ日本が率先して課題とすべきだ。バンクーバー大会はスピードスケートにおける空気抵抗の重要性がカナダ国民の知性にまでは成熟していなかったことを立証したが、今後開催されるロシアのソチオリンピックや韓国の平昌はどのような知性を示してくれるのであろうか。

## 22. 氷筈リンクの発展

### 22.1 次世代高速スケートリンク

スピードスケートリンクは一周400m、直線部分と半径26m（インコース）および半径30m（アウトコース）のコーナー部からなる。スラップスケートの登場や室内スケートリンクの登場によって滑走速度が高速化し、コーナー部で発生する大きな遠心力のため転倒する事故が発生している。スケートの刃は幅1mmと狭く、その上、長さ方向にわずかに湾曲している。そのため、スケートと氷との接触面積が小さく、氷への食い込みも小さいため、遠心力が十分に支えられないことが原因である。

遠心力は速度の2乗に比例して増大するから、秒速15mでは体重と同程度の遠心力が発生する。その遠心力がスケートと氷の間のわずかな接触によって支えられている。選手は氷の支持能力を敏感に感じ取り、速度を調整する。記録更新に挑戦する一流選手はインコースの手前から加速を止め、あるいは曲率半径が大きくなるようにコース内で遠回りをして減速を小さく抑えている。

スケートの刃が氷に食い込んだ分の氷は刃の外側と内側に押し出され、盛り上がりを作

っている。この盛り上がり部は小さなバンクの役割を果たし、スケートの遠心力を支えるのに寄与する。通常のリンクでは氷の結晶粒はランダムな方向を向いているから、エッジの外側に押し出される氷の形状は結晶粒毎に異なる。より効果的なバンクを作るにはスケートの刃によって氷がより効果的に外側に押し上げられるように配置すればよい。図 68 の摩擦痕に現れている氷の変形がヒントを与える。氷の柱面(10 $\bar{1}0$ )が摩擦面となるように氷をコーナー部に貼り付ける。c 軸は水平面内にある c 軸がコーナーの接線方向に対し 30 度程度内側前方を向くように配置すれば、滑走するスケートの刃によって、氷が外側前方に流動し、バンクを作るであろう。このバンクは遠心力の支えに加担するから選手はより高速を目指すことが出来るようになると期待される。コーナー部はエッジの食い込みの深くなる氷が好記録につながるであろう。この氷は自己バンク形成氷であり、次世代氷筍リンクの核心部分になる筈のものである。

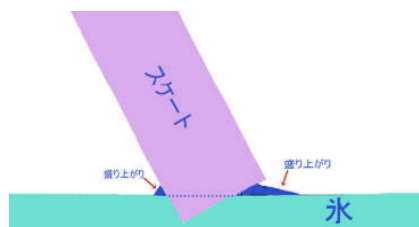


図 141 コーナーでのバンク形成

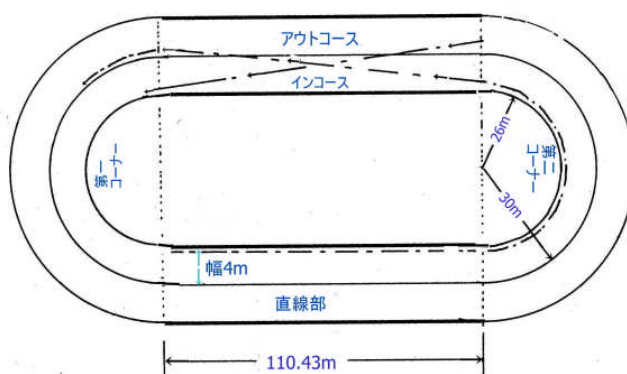


図 142 スピードスケートリンクの国際規格

刃によりバンクを作っていく自己バンク形成氷がコーナー部に最適である。氷がより大きな遠心力を支えるようになると、選手はコーナー部で加速可能となり、潜在力が引き出され、記録更新につながると期待される。氷筍リンクはスピードスケートというスポーツとトライボロジーという科学を結びつけ、スポーツ科学の革新につなげた人類初の試みであった。この優れた日本の挑戦を発展させ、世界の頂点に立ちたいものである。

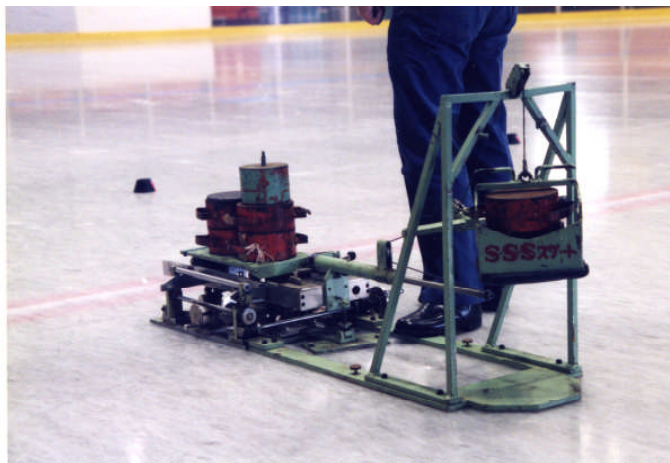
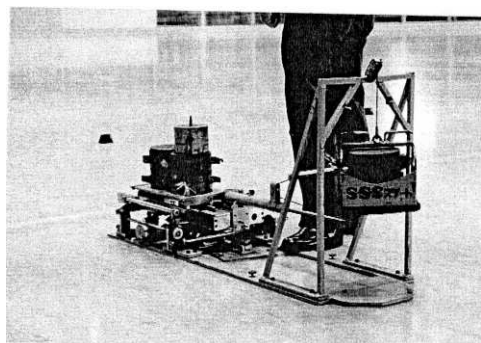


図 143 カタパルト式スケートの摩擦試験装置

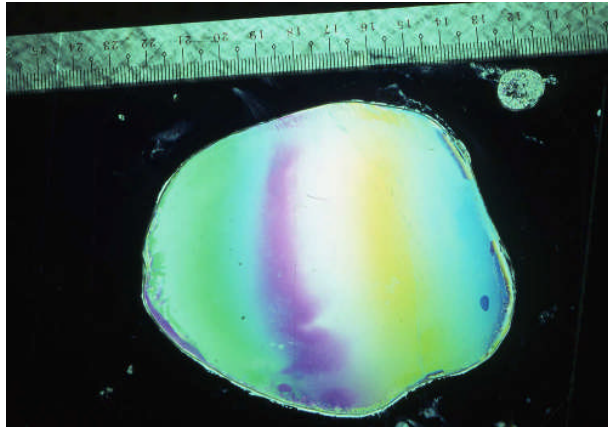
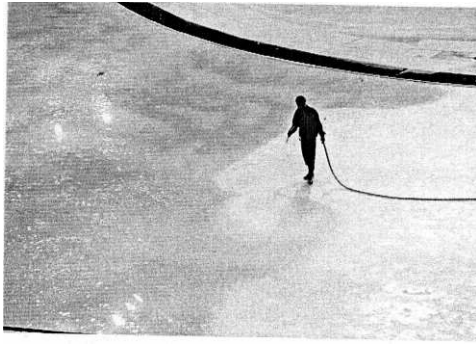


図 144 製氷作業, 40℃のお湯を 0.5mm の厚さに撒く。一晩に 10 回散水すると 5mm の厚さが増す。6 日で 30mm の厚さとなる。

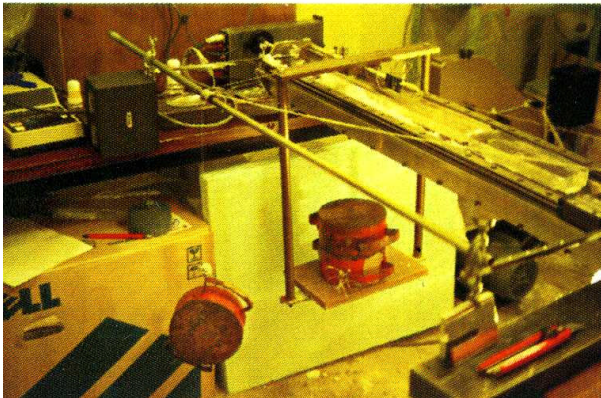


図 145 バンク形成氷探求のため, 刃を傾斜させ, 水平力と鉛直力を同時に加えた実験法が考案された。

## 22.2 カーリング

### 1. カーリングリンク

カーリングリンクは図 146 に示されるように長さ 40.24m のペブルのついた氷のリンクにストーン投入部, 滑走部, ハウスがあり, ホッグライン, ティライン, バックラインハウスの円の大きさ等の位置が決まっている。ストーンの直径は 0.3m, 質量 19.96kg である。競技はチーム対抗で行われる。ストーンは前進速度と同時にゆるい自転の回転を与えられながら, 投げ出されるのが普通である。そのため, 氷とストーンの相対速度は自転速度分が加減され, 進行方向の左右でわずかに異なる。滑走速度が遅くなると, 摩擦係数の速度依存性がストーンの運動に反映され, ストーンは進行方向に向かって左右にカーブするようになる。ストーンの自転が左回転なら左側の速度が遅くなる(低速では速度の遅いほど摩擦が大きい)から, ストーンは摩擦の大きい左側にカーブし, 右回転なら摩擦の大きい右側にカーブする。[氷雪路面での自動車のスリップの場合, ブレーキのかかった自動車は摩擦の小さい車輪側が慣性で前進し, 摩擦の大きいタイヤ側は急減速し, 自動車があたかも摩擦の多い側を軸に回転するようにカールするのに似ている。ただし, カールの機構の議論ではストーン「前後の摩擦の異方性(後面が前面より摩擦大)」がカールの原因であるとする主張もある。]

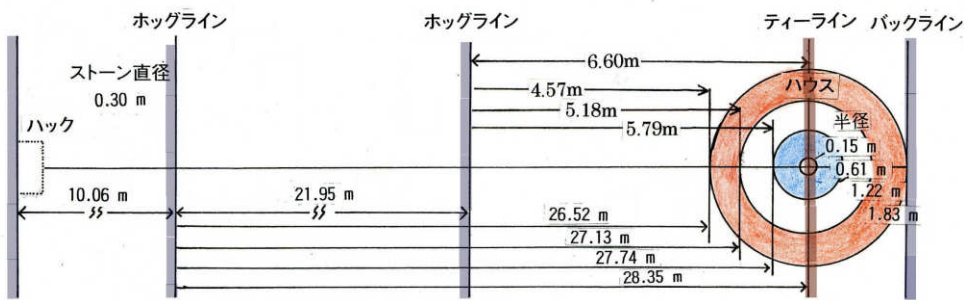


図 146 カーリングリンク

カーリングは秒速 3m 以下の低速でストーンを滑らせる。トライボロジーの深く関与した競技である。低速のため、氷の粘弾性的性質が滑りに反映され、摩擦の速度依存性がストーンの運動を左右する。特に、科学者の興味を引きつけたのはカールであり、カールの議論では次の二つの命題に対しに答えるかが課題とされている。

- ①ストーンは自転の方向にカールする。時計回りの自転が与えられると時計回り(右側へ)カールし、反時計回りの自転が与えられると左側へカールする。速度の遅い領域でカールが大きい。
- ②カールの大きさはストーンの初期自転速度にあまり関係しない。

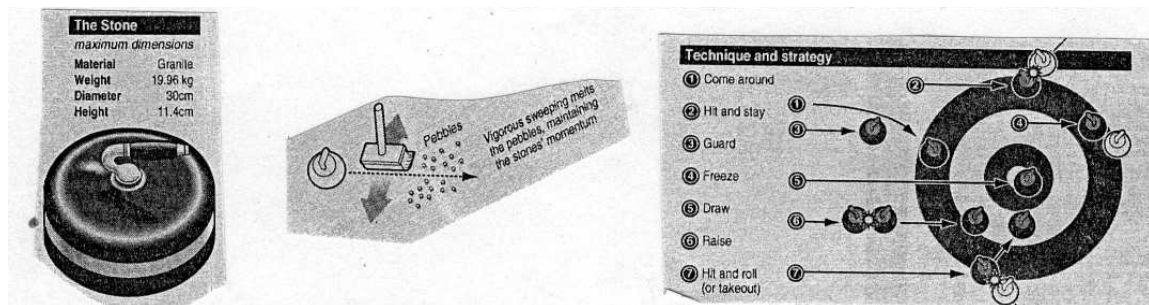


図 147 左：カーリングストーン 中央：ペブルをブラシで掃く 右：ストーンが向かうハウス

## 2. ストーンの運動

ストーンを質量を  $m (=19.96\text{kg})$ 、初速度を  $V_0$ 、滑走停止距離を  $l$ 、滑走開始からの経過時間を  $t$ 、重力加速度を  $g (=9.8\text{m/s}^2)$  とすると、摩擦係数  $\mu$  と滑走中の速度  $V$  は次のように決まる。まず、 $t=0$  でのストーンの運動エネルギー  $(1/2)mV_0^2$  が徐々に摩擦エネルギーに変換されて、停止すると運動エネルギー  $0$  になり、完全に摩擦エネルギー  $\mu mgl$  に変換される。

$$(\text{運動エネルギー}) = (\text{摩擦エネルギー}) \quad (1/2)mV_0^2 = \mu mgl$$

摩擦力 ( $\mu mg$ ) はストーンの運動を妨げる力であり、加速度を  $a$  として、力の定義から

$$F=ma=m(dV/dt) = -\mu mg$$

上の式では加速度が単位時間における速度の変化に等しい ( $a=dV/dt$ ) という関係を用いている。積分すると、

$$(\text{速度 } V) \quad V=V_0 - \mu gt$$

ストーンの停止までの時間を  $t_s$  とすると、



$$\mu = V_0/gt_s \quad V_0 = \mu gt_s$$

$V_0$  を運動エネルギーの式に代入して、摩擦係数  $\mu$  を求めると、

$$\mu = 2l/(gt_s^2)$$

を得る。つまり、滑走停止距離  $l$  と滑走時間  $t_s$  の測定から摩擦係数  $\mu$  が決定できるわけで、テレビ中継を見ながら、ストップウォッチで滑走停止時間  $t_s$  を測り、画面上のストーンの停止位置から滑走距離  $l$  を見積もれば、おおよその摩擦係数  $\mu$  を決定できることになる。(ストーンの投げ出し位置は決まっており、リンクの寸法、ハウスの輪の位置と大きさも定まっているから、距離  $l$  のおおよその見当がつく。また、別個にハウスに近い方のホックラインから停止までの時間を計測すれば、低速域での摩擦係数の見積もりを与える。)

表 滑走停止距離  $l$ 、滑走停止時間  $s$  と平均摩擦係数  $\mu$  の値

t s	l, m					t s	l, m			
	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m		20 m	26.52	28.55	30 m
5	0.0326	0.0408	0.0490	0.0571	0.0653	16	0.0159	0.0211	0.0228	0.0239
6	0.0227	0.0283	0.0340	0.0397	0.0454	18	0.0189	0.0167	0.0180	0.0128
7	0.0167	0.0208	0.0250	0.0292	0.0383	20	0.0102	0.0135	0.0146	0.0153
8	0.0128	0.0159	0.0191	0.0223	0.0255	22	0.0084	0.0112	0.0120	0.0126
9	0.0101	0.0126	0.0151	0.0176	0.0202	24	0.0071	0.0094	0.0101	0.0106
10	0.0082	0.0102	0.0122	0.0143	0.0163	26	0.0060	0.0080	0.0086	0.0091
11	0.0067	0.0084	0.0101	0.0118	0.0135	28	0.0052	0.0069	0.0074	0.0078
12	0.0057	0.0071	0.0085	0.0100	0.0113	30	0.0045	0.0060	0.0065	0.0068
13	0.0048	0.0060	0.0072	0.0085	0.0097	32	0.0040	0.0053	0.0057	0.0060
14	0.0042	0.0052	0.0062	0.0073	0.0083	34	0.0035	0.0047	0.0050	0.0053

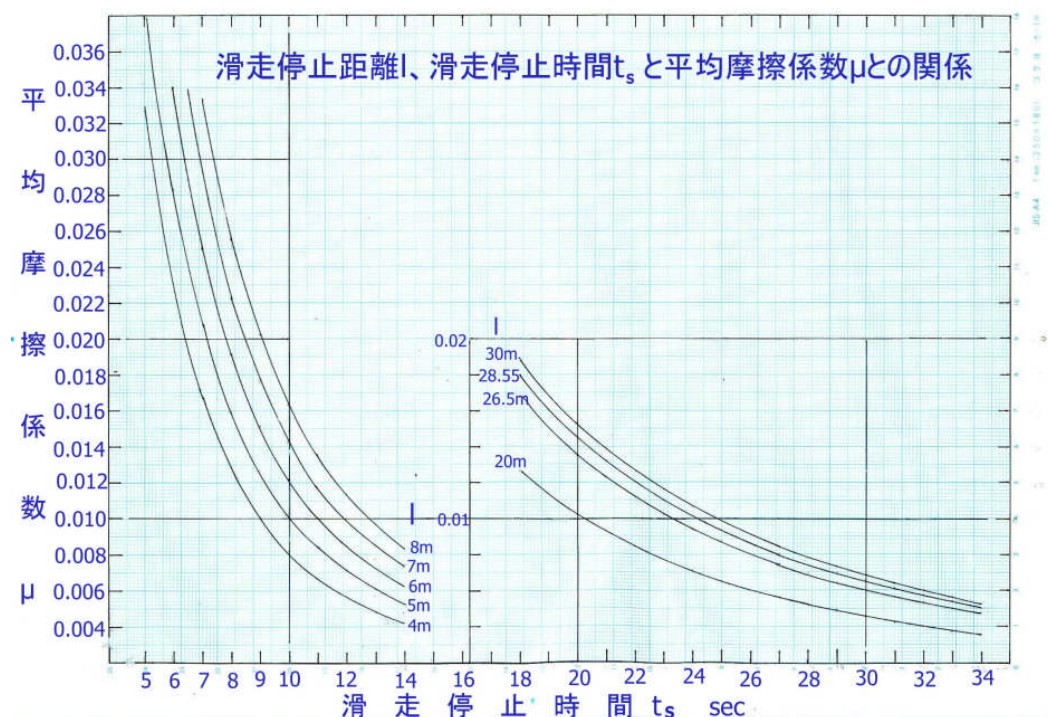
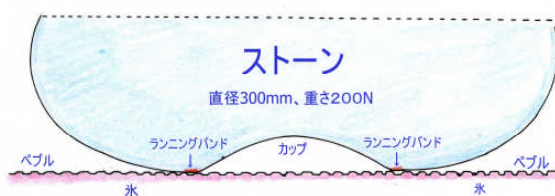


図 148 滑走停止距離  $l$ 、滑走停止時間  $t_s$  と平均摩擦係数  $\mu$  の関係

### 3. ランニングバンドとペブルとの真の接触面積



図 149 左：ストーンの底面に載せた透明板通してみたランニングバンド（帯状の白い輪）  
右：底面を霧吹きで濡らすと左の白い帯は透明に変わる



ランニングバンド（内径 120mm，外径 130mm）とカップ（中央の凹み）の図解

ストーン底面にはランニングバンドと呼ばれる幅 5mm 程度のリング状の平坦面がある。このランニングバンドがアイスシートのペブルに接触しながら滑っていく。摩擦は真の接触部で生じ、真の接触部とは二面が分子間距離に接近した領域であるから、見かけの接触面積（ランニングバンドの面積）のうち極小部分である。この真の接触面は実測されていないので不明なのであるが、氷の硬さから真の接触面積の大きさを推定してみよう。ストーンを氷の上に載せた瞬間の真の接触面積は極めて小さいであろう。しかし、その真の接触面積にストーンの荷重 200N が集中するから、氷が荷重を支える限界を超え氷が塑性変形して真の接触面積が拡がり、真の接触面の圧力が減少する。ちょうど氷の降伏圧力に達したところで面積の拡大が止まり、真の接触面積の大きさを与える。この圧力は同様の測定が行われる氷のブリネル硬さ（表 14）から与えられる。 $-4^{\circ}\text{C}$  で Butkovich によるブリネル硬さの測定値は  $60\text{MPa}$  である。これは真の接触面積（合計）として  $3.3\text{mm}^2$  を与える。ペブル上面の真の接触面を仮に  $0.5\text{mm}^2$  とすると、真の接触をしているペブルの数は 7 個程度と見積もられることになる。以上は硬さを最大値にとった時の見積もりであり、ランニングバンドは平坦面、氷の表面が湾曲という違いがあるから、真の接触面の圧力はブリネル硬さの測定値より小さくなる。圧力が 3分の1に減少しているとすれば、真の接触面積の合計は  $10\text{mm}^2$ 、各真の接触目も大きくなるから、真の接触をするペブルの数は 10 数個に増えると見込まれる。

### 4. 摩擦機構

摩擦機構が固体間の接触である凝着によるのか、摩擦面に融け水の介在する液体潤滑によるのかの判定は真の接触面の剪断強さ  $S$  の値から判定される。剪断強さ  $S$  の値が  $0.1\sim 1\text{MPa}$  程度ならば凝着の摩擦機構であり、 $0.001\text{MPa}$  以下の小さな値なら液体潤滑

の摩擦機構ということになる。ストーンの摩擦係数は 0.01 内外であるから、摩擦抵抗(真の接触面の剪断力)  $F$  は  $F=0.01 \times 200N=2N$  である。一方、 $F=SA$  ( $A$  は真の接触面積) であるから、 $S=F/A=2N/(10 \times 10^{-6}m^2)=0.2MPa$  となり、凝着の摩擦で機構であることが導かれる。

#### 5. カーリング・ストーン

ストーンは硬い花崗岩からできていて、直径 0.3m、質量 20kg、底面の中央部はカップと呼ばれ凹んでいて、直径 130mm、幅 5mm 程度のリング状接触部がある。このリング部をスリップリングという。上面にはストーンを投入したり自転を与えるための取っ手が付いている。2 年ほど使用すると取っ手を外し、ストーンの上下を入れ替えて使用する。

#### 6. カーリング・ストーンのカール機構

カーリング・ストーンがなぜ曲がった運動をするのかについて科学者の関心が引きつけられてきた。ストーンの運動とカールについては次の点が知られている。

①**自転とカールの方向** ストーンは緩い自転(角速度  $\omega$ ) をもって滑走し、速度 ( $V$ ) が遅くなる領域で自転 の方向にカールする。

(時計回り(右回り)の自転が加えられた場合は右側にカールし、反時計回り(左回り)自転が加えられた場合は左側にカールする。)

②**カールの距離** カールの距離は初期自転の角速度  $\omega$  にあまり依存しない。

③**ストーンの滑走停止と自転の停止は同時にである。(自転は停止まで続く)**

カールの問題は上の①、②に答えることである。①のカールの方向については、左右摩擦異方性起因説と前後摩擦異方性起因説の二つの学説がある。左右摩擦異方性説では自転が加わることにより増速となる側の摩擦が小さく、減速となる側の摩擦が大きくなることに着目している。これは速度が遅いほど摩擦が大きくなるという摩擦特性に基づいている。一方、前後摩擦異方性説ではストーンの前方の摩擦が小さく、後方の摩擦が大きいと仮定される。しかし、カールと結びつけて後方の摩擦が大きくなる機構を氷の特性から合理的に導き出すことが難しいように思われる。ストーンの全面にわたる通常のスウィーピングは全面にわたる氷温を上昇させ、摩擦を小さくする。一方、スウィーピングの停止と同時に氷温は下がり始め(摩擦が増大し始め)るから、ストーン前面の摩擦が小さく、後面の摩擦が大きい条件を満たす。

エッジ・スウィーピングというストーンの片側だけをスウィープしてストーンをカールさせる方法に着目すると、スウィーピング側の氷温が上昇して摩擦を小さくし(自転を加えられたストーンの高速側に相当)、スウィーピングと反対側にカールする。この場合、ストーンに自転を与える必要は無い。

③の自転するストーンの自転速度の減衰について

ストーンの自転が滑走の終端まで長く続くことは驚異である。ストーンの質量を  $m$  ( $=20kg$ )、半径を  $R$  とすると、ストーンの中心軸の周りの慣性モーメントを  $I$  とすると、

$$I = (1/2) mR^2$$

なので、

$$I = 0.225kg \cdot m$$

となる。

接触リングの半径を  $r$  ( $=0.065m$ )、自転の初期角速度を  $\omega_0$  ( $=0.8s^{-1}$ )、摩擦係数を  $\mu$

(=0.01)とすると、単純な回転だけなら、

$$2 \pi n m g \mu = (1/2) I \omega_0^2$$

で示される  $n$  まで回転する。ただし、 $g$  は重力加速度、 $n$  は回転の程度である。数値を代入すると  $n$  はわずか 0.1 回転となる。しかし、経験によると滑りながら自転している場合には回転速度が殆ど減衰を示さない。この理由を理解するために速度  $v$  で並進運動をしながら自転しているときのストーンの中心を通り進行方向からの角度  $\theta$  に当たる接触リング部のリングの接線方向の摩擦係数成分  $\mu_\theta$ 。（この摩擦係数が自転の抵抗に関係する）を求めた結果は

$$\mu_\theta = (f_\theta/f) \mu = \{r \omega / [v^2 + 2r \omega v \cdot \sin \theta + (r \omega)^2]^{1/2}\} \mu$$

で与えられる。ただし、 $f$  は角度  $\theta$  方向にある接触リング部に働く摩擦成分、 $f$  の接線方向の成分が  $f_\theta$ 、 $v$  はストーンの  $y$  軸方向の速度（滑り速度）である。 $v = 1\text{m/s}$ 、 $r \omega = 0.05\text{m/s}$ 、 $\mu = 0.01$  とすると、 $\mu_\theta = 0.0005$  という極めて小さい値が導かれる。つまり、滑り速度が自転方向の速度に比べて大きいときには自転に対する摩擦抵抗は極端に小さくなり、事実上自転速度を変えずに滑走することが理解される。

氷筍リンクの作成方法でベースの氷を作る。その上にペブルガンで微水滴を落とし、oriented over growth させると、ベースと同じ結晶方位のペブルを作ることが出来る。(0001)面のベース氷の上に、 $c$  軸が鉛直のペブルを作ると、最も摩擦の小さいリンクを実現できるであろう。

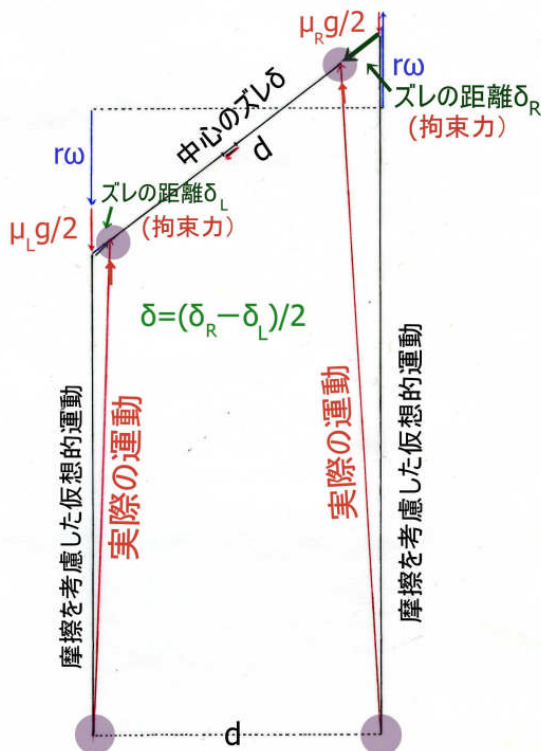


図 運動解析

左右端にある円形スライダーを長さ  $d$  の棒でつなぎ滑らせたときの運動解析を左図に示す。左側のスライダーの摩擦（摩擦係数  $\mu_L$ ）は大きく、右側のスライダーの摩擦（摩擦係数  $\mu_R$ ）は小さいと仮定している。

棒  $d$  による拘束がないとしたときの運動が仮想的な運動であり黒線で示している。実際の運動はスライダー間が  $d$  の長さに固定されているために、スライダーは赤線のように運動する。仮想的な運動と実際の運動のズレ  $\delta_L$ 、 $\delta_R$  がスライダーに働いた力の方向と大きさを表すことになる。

図には棒の中心のずれ  $\delta$  の大きさも示されている。

ストーンの左右に摩擦の違いがあれば、自転を伴った滑走の過程でこの図に示されるような拘束力が現れ、カールを生じさせると考えられる。

**特別講義 運動解析 単位時間の仮想的運動と実際の運動のズレの距離  $S$  の 2 倍は加速度  $a$  に等しい**

ここに提供するものは、ああそうか、そう考えるといいんだという何とも簡単な話である。

まず話をおなじみ、重力下での落体の運動(図 1)からはじめよう。重力  $g$  の下での自由落下の式は落下時間を  $t$ 、落下速度を  $V$ 、落下距離を  $S$  とすると、実際の運動は(仮想的には物体は静止状態からスタートするので動かない)

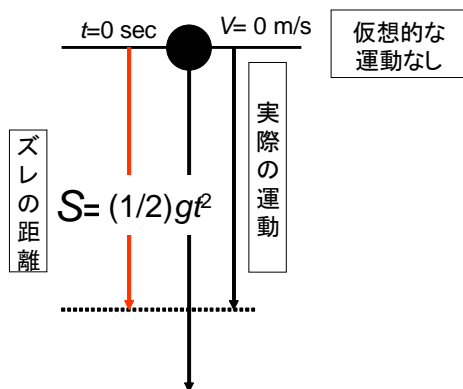


図 1 自由落下

$$V = gt \quad (1)$$

$$S = (1/2)gt^2 \quad (2)$$

と表されることは誰でも知っている。

しかし、(2)式から単位時間について

$$g = 2S \quad (3)$$

が導かれること、つまり、「**加速度は単位時間のズレの距離の2倍に等しい**」という関係は意外に知られていないと思う。仮想的運動を始点、実際の運動の終端する向きが加速度ベクトルの方向となる。

この有用な関係のいくつか適用例を示そう。

**例 1. 地球をまわる人工衛星に働く向心加速度**

人工衛星は地表に近い高度  $h$  のところを速度  $V$  で回っている(図 2)。地球の半径を  $R$  とする。衛星は常に速度  $V$  で接線方向に飛ぶが、地球の引力に引かれ常に単位時当たり  $S$  だけ地表に向かって落ち続けている。その結果、実際には人工衛星は地表上  $h$  の高さの円軌道を描く。三平方の定理から、

$$V^2 + (R+h)^2 = (R+h+S)^2 \quad (4)$$

の関係がある。ここで、

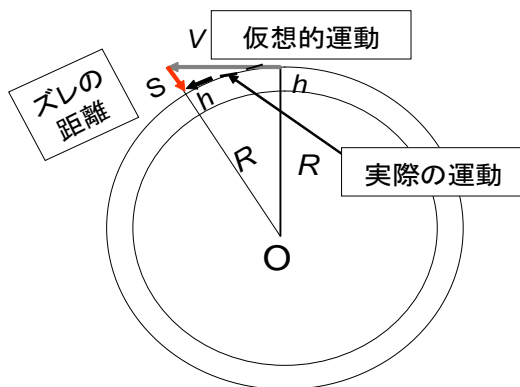


図 2 高さ  $h$  を周回する人工衛星に働く向心加速度

$$R \gg h, \quad R \gg S \quad (5)$$

だから、

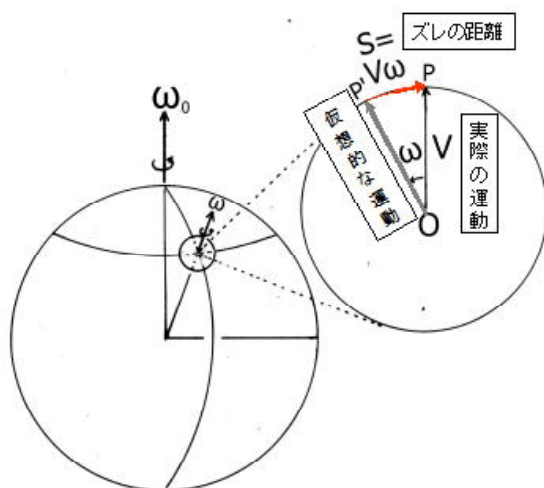
$$V^2 = 2SR \text{ つまり } 2S = V^2 R^{-1} = GM R^{-2} \quad (6)$$

のよく知られた関係が導かれる。

$G$  は万有引力定数、 $M$  は地球の質量である。(弧を描く運動では、遠心力という用語がよく用いられるしかし、**遠心力は仮想的な力で、実在する力ではない**といわれる。)

## 例 2. コリオリの加速度 $\alpha$

図 3 の地球は十分大きいから、観測者は角速度  $\omega$  で回転する円盤の中心にいると考えてよい。その中心から動径方向に向かって速度  $V$  で発射された物体の 1 秒後のずれ  $S$  は  $V\omega$  に等しいから、加速度  $\alpha$  は



$$\alpha = 2S = 2V\omega \quad (7)$$

となり、コリオリの加速度が導かれる  $2V\omega$  の  $V\omega$  はずれの距離、2 はその 2 倍を意味している。なんだということだったのかと思て頂ければ本望である。自転する地球の場合  $\omega$  は自転ベクトルの地表に垂直方向の成分である。

地球の自転の角速度を  $\omega_0$ 、緯度を  $\phi$  とすると、 $\omega = \omega_0 \sin \phi$  である。地球は大きいから物体は各緯度に中心をもつ大きな円盤上で運動していると見なしてよい。

図 3 自転する地球上の物体の運動

## 例 3. スピードスケート競技でコーナーを回る時の遠心力

スピードスケート競技ではコーナー部の半径  $R$  はインコースが 25m である。  
 $V=15\text{ms}^{-1}$  でコーナーを回る時に選手が受ける向心加速度  $\alpha$  は

$$(R+S)^2 = R^2 + V^2 \quad (8)$$

の関係から

$$2RS = V^2 \text{ つまり } \alpha = 2S = V^2 R^{-1} = 9\text{ms}^{-2} \quad (9)$$

となり、重さに匹敵する遠心力が発生することがわかる。アウトコースの半径は 30m なので、向心加速度は  $7.5\text{ms}^{-2}$  となり、遠心力はインコースの場合より 17% も小さい。

## 例 4. カーリングストーンのカールの場合

$y$  軸方向に  $V=1\text{ms}^{-1}$  で発射されたストーンが 1 秒後、 $y$  に直交する  $x$  軸方向に  $S=0.1\text{m}$  ずれていたとすれば、 $x$  軸方向の加速度  $\alpha_x$  は

$$\alpha_x = 2S = 0.2\text{ms}^{-2} \quad (10)$$

$$V_x = \alpha_x t = 0.2t \quad (11)$$

$$S_x = 0.1t^2 \quad (12)$$

としてストーンの横方向の運動方程式が簡単にかれる。

## 例 5. スケートや車両の滑り摩擦係数 $\mu$

速度  $V_0$  で通過した質量  $m$  のスケートや車両が 1 秒間に  $X$  だけ前進していたとすれば

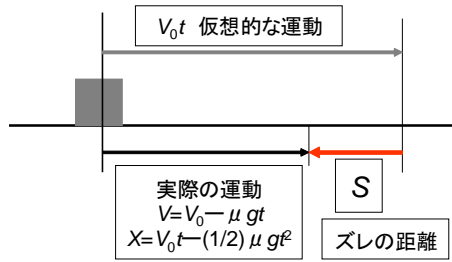


図 4 摩擦のある場合

ずれの距離  $S$  は図 4 のように速度  $V_0$  で通過す  
物体の滑り

$$S = X - V_0 \quad (13)$$

力を  $F$ , 摩擦係数を  $\mu$  とすると

$$F = mdV/dt = -\mu mg = 2mS \quad (14)$$

だから

$$dV/dt = 2(X - V_0) = -\mu g \quad (15)$$

$V_0 = 1\text{ms}^{-1}$ ,  $X = 0.9\text{m}$ ,  $g = 9.8\text{ms}^{-2}$  とすれ  
ば,  $S = -0.1\text{m}$  マイナス記号は負の加る速度つ

まり減速を意味する。摩擦係数は  $\mu = 0.02$  と求まる。

捕捉 自由落下の 1 秒から 2 秒までの 1 秒間を問題にする場合。

この場合, 初速  $V$  は  $V = gt (=9.8\text{ms}^{-1})$  であり, 1 秒後の位置  $X$  は  $X = Vt + (1/2)gt^2 = (3/2)g$  である。ずれの距離  $S$  は

$$S = X - Vt = (3/2)g - g = (1/2)g \quad (16)$$

したがって, 加速度  $\alpha$  は

$$\alpha = 2S = g \quad (17)$$

と求まる。

ここに示した式は見かけ上ディメンションがあわないように思われるが, それは時間  $t$  を 1 とおいているためにディメンションが陽には現れていないだけであり, 陰には時間に関するディメンションが付属していることを注意したい。

### 22.3 スキーコースの雪粒の結晶方位の制御

カーリングリンクのペブルの結晶方位のコントロールができたことで, 一個一個のペブルの大きさを 1mm 程度の大きさに調整できれば, 人工的な雪面が得られることになる。結晶方位の揃った異なる雪面間の摩擦の違いを測定することで, スキーの摩擦機構について決定的な結論を下せるようになると期待される。

雪面を変える代わりに, 氷のスライダーの表面を雪粒状に加工し, それを板状試験片に滑らせても同様の結論を導き出すことが出来るであろう。

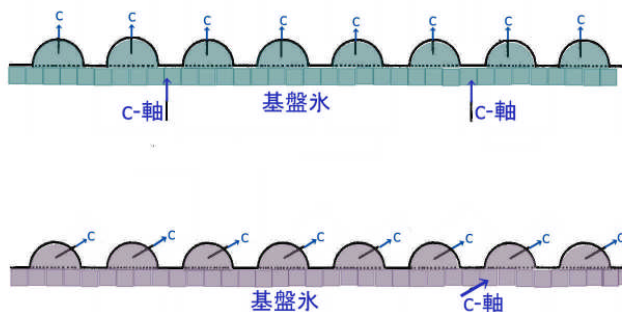


図 148 雪粒の結晶方位のコントロール (アイスバーン面の最上層の雪粒を想定)

雪面の雪粒の結晶方位コントロールなど、人類史上考えた人もいないであろう。粒径 1mm 程度の小さな球状雪粒の主軸方向を見定めるのは容易でない。したがって、無数にある雪粒の一個一個の結晶方位を揃えることは全く無理だと考えられ、考える前に、そういう考えを持つこと自体を否定してしまう。

しかし、氷筍リンクで巨大なスケートリンクの個々の氷の結晶方位が揃えられたことで、事態は一変した。まず、カーリングリンクのペブル（粒径 10mm 程度）の結晶方位のコントロールが可能になった。そして、ペブルを小さくすることで雪面のコントロールも可能だと考えられるようになった。もちろん、実際の競技用スキーコースの雪面を変えることは出来ない。しかし、研究用のミニスキーコースの雪面なら雪粒の結晶方位を揃えることは可能である。

アイスバーンの雪面は良く滑る。競技ではこのような固い雪面が好んで使われる。滑降中のスキーは表面のわずか一層の雪粒の上を滑っている。つまり、氷の板の上に一層の雪粒があるのと同じである。このような考えから、雪面の結晶方位コントロールによって、スキーの摩擦機構に最後の審判が下される日が近づいていると言える。

もし、雪の結晶方位によって、摩擦が異なる結果が見出されたとすれば、その結果は摩擦融解説では説明できず、唯一凝着説だけがスキーの滑りに説明を与える。

22.2 や 22.3 に述べた氷の結晶粒の結晶方位コントロールは氷筍リンクの研究中は思いもつかなかった新展開である。独創的研究に潜む面白さといえよう。

#### 22.4 短距離選手と長距離選手：速筋と遅筋の違い

スピードスケート競技には 500m, 1000m の短距離競技と、1500m, 3000m, 5000m, 10000m の中・長距離競技の種目がある。短距離の 500m は 34 ~ 35 秒、呼吸数にして 10 呼吸程度の短時間で滑り抜く。ここでは瞬発力の競技となる。選手が滑走中に使うエネルギーの源は選手の身体にあらかじめ蓄えられた筋力や脂肪などが主である。これに対し、長距離の 5000m の滑走時間が 6 分程度、1 万 m が 12 分程度であり、持久力と呼吸が共に関与し、特に持久力が競われる。

人には瞬発力つまり速筋繊維に恵まれた選手と持久力つまり遅筋繊維に恵まれた選手の二種類があるといわれる。競技に関係の深い太股には約 100 万本の筋繊維があり、その数は生まれつきのもので、練習をしても殆ど遅筋、速筋の数を変えることが出来ないということである。

話は変わるが、魚の泳ぎ、動物の運動にも二種類あり、ヒラメのように白味の魚は瞬発力に優れ、マグロやクジラのように赤身の魚は持久力に優れているといわれる。動物のウサギは瞬発力に優れ、馬は持久力に優れている。それらは速筋と遅筋の違いでもある。

人の場合は、スポーツ以外の面でも一夜漬けや追い込みの得意な瞬発型の人とゆっくりだが着実に成果を挙げていく持久力型の人がいる。

短距離タイプの人に長距離の練習をさせても、あるところまでしか伸びない。逆に、長距離タイプの人に短距離を仕込んでも効果に限界がある。そんなことから、自分自身の能力や適正の読み違い、指導の誤りなども起こりうるであろう。ここでは人的確性を間違いないく把握し、効果的な選択が大事である。

スピードスケートの競技記録を見て驚かされるのは 500m 競技より、1000m 競技の方



が平均速度が早いことである。5000m や 1 万 m ではわずかに平均速度が落ちる程度である。これはスピードスケート競技に特有のものであり、陸上競技とは著しく異なる。

オリンピック競技の中で平地を移動するものは多いが、スピードスケートが最も早い速度であることも注目される。

速度が速いから、人体の受ける空気抵抗が競技記録を大きく左右するのもスピードスケートの特徴といえる。

表 最高タイムと滑走の平均速度

男 子			女 子		
距離, m	タイム	平均速度, m/s	距離, m	タイム	平均速度, m/s
500	34 <sup>s</sup> 30	14.58	500	37 <sup>s</sup> 30	13.40
1000	1 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 95	14.89	1000	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 83	13.54
1500	1 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 95	14.43	1500	1 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> 02	13.16
5000	6 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 66	13.35	3000	3 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 70	12.62
10000	12 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 92	12.84	5000	6 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 91	12.29

## 22.5 冬季オリンピック競技（スピードスケート）の勘所

冬季オリンピックは人類の技能や身体的能力への挑戦である。またメダル獲得が目指され、勝負の世界でもある。勝つ選手がいれば、負ける選手もいる。観客としてはそのような勝負の世界が本質的に嫌いだという人も多いことであろう。むしろ、勝負にこだわらず、技能や記録への挑戦を楽しみにする人が多いと思う。

スキー競技やスノーボード、ソリ競技は本質的に勝負の世界であり、歴代の記録が競われることはない。世界中に同じ競技コースが存在しないし、たとえ同じ競技場でも日により、時刻によりコースの条件が変わる。だから、異なる競技施設の記録を比較することに意味がないし、同一競技施設でも歴代の記録が競われることはない。

以上のようなウインタースポーツの中で唯一の例外が「スピードスケート競技」である。スピードスケートリンクにはリンクのサイズに関して細かな国際規格があり、公認された世界中のリンクで記録が競われる。規格は氷質（水の純度、氷温、表面の平滑度、氷の結晶粒の大きさや向き）については特に定められていないから、各リンクの製氷担当者は氷質調整で好記録を出そうと鋸を削る。もちろん、記録は選手が作るものであるから、どんな素晴らしいリンクがあっても、一流選手が参加する大会がなければ、リンクから記録は生まれない。

スピードスケートの記録を左右する要素の第一は空気抵抗である。空気抵抗は速度の二乗に比例するから、高速化するほど空気抵抗は大きくなる。また空気抵抗は空気の密度に比例するから、空気密度の小さい高地のリンクが有利となる。世界新記録が高地のリンクから生まれる理由ともなっている。室内リンクの登場する 1988 年以前はロシアのメディオという標高 1750m のリンクが伝説の記録製造リンクとされてきた（メディオスケートリンクは 1972 年ソビエト連邦時代に建設され、高速リンクとして知られていた。標高 1750m、現在はカザフスタン共和国に所属している）。もちろん、標高が高ければ酸素濃



カザフスタン・メディオ・スケートリンク

度も薄いわけで、長距離競技には不利な面もある。その後、1988年のカルガリーオリンピックで最初の室内スケートリンクが使われた。カルガリーは標高1050mの高地にあり、空気抵抗も小さい。メデオに比べれば標高の点で不利はあったが、無風、適度に高い室温と低い氷温という室内環境や氷質管理によって、記録製造リンクとして君臨するようになった。2002年ソルトレークオリンピックは標高1400mに競技リンクがあり、記録ラッシュの大会となった。このように、空気抵抗の小さいリンクが記録製造、高速リン

クの第一条件である。

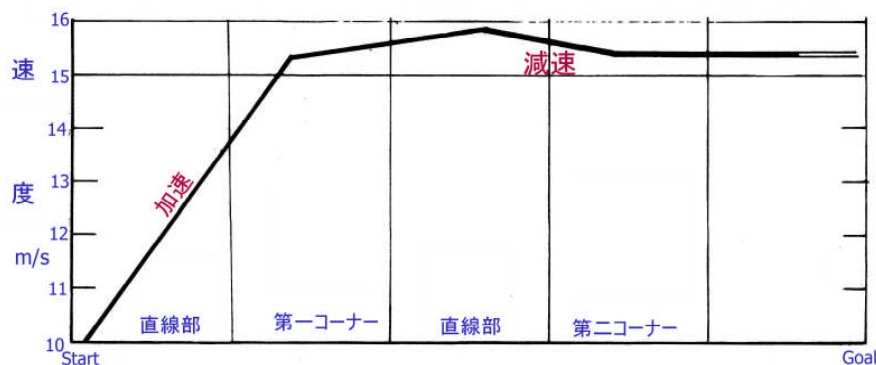
カルガリーやソルトレークは地形的に高地に都市があり、地の利があった。もちろん、冬季オリンピックはアルペン競技も行われるから、高地を持たない開催国は存在しないであろう。スケートリンクを平地（都市部）に作るか、記録の望める高地に作るかは開催国の知性によると考えてよいだろう。極端な言い方をすれば、平地にスピードスケートリンクを作る開催国が国際社会から尊敬を得ることはないし、国民の誇りにつながることもない。

ただし、高地に比べて平地の都心部の方が交通や利用の便が良いのはいうまでもない。では、平地（低地）にリンクを作りたいときはどうするか？高地と同じ条件を再現できるように、減圧機能を備えた建物の中にリンクを作るべきである。そのような国民的世論を持つ国は成熟した知性の国であり、国際社会から尊敬されるにふさわしい。今後の冬季オリンピックの見所ということになる。

選手の受ける空気抵抗が記録を左右することを好例に3人一組になって滑るパシュート競技(pursuit)の記録が一人が単独で滑る記録を上回るというのがある。パシュートでは最後尾のランナーのゴールタイムで勝負を競う、その記録は上位の選手が一人で滑る場合より劣るはずだと考えがちだ。だが結果は逆でどの選手が一人で滑るときの記録よりも3人で集団となって滑る方が好記録を産むのである。秒速13mを越える速度で滑る先頭の選手には大きな空気抵抗が加わるため体力の消耗が大きく、速度が落ちる。しかし、後続の選手は先頭の選手の風下になるため受ける空気抵抗が比較的小さく体力を温存できる。滑走中に次々に先頭が入れ替わることによって高速を維持でき、一人一人の能力以上の好記録を達成している。

スピードスケート競技が高速化した結果、新たな問題が発生した。それは、コーナー部で遠心力が大きくなりすぎて、氷が刃を支える能力を超え、しばしば選手の転倒が発生するようになったことである。500m競技の場合には選手は第二コーナー部で加速できず、転倒防止のため逆に減速し、力を出し切れずにいる。製氷担当者も未だこの問題に有効な氷を提供できない。筆者は氷の塑性変形を活用した自己バンク形成氷（次世代氷筍リン

ク)を提案している。滑走するスケートが氷にめり込み、同時に刃の外側に押し出された氷が遠心力支持の役割を果たし、選手の潜在力を引き出して、さらに記録向上につながると期待される。



500m 競技の滑走からゴールまでの速度変化

冬季オリンピックは世界の注目のもとで開かれる人類最高のスポーツの祭典である。この祭典を自国の国民の誇りにつなげるのは、上に述べたスポーツ科学に対する理解、リンクが備えるべき条件をある程度周知できる国民だけが達成できる栄誉ということになるのであろう。

前節の各競技の平均速度の表から 500m より 1000m の平均速度が速いことが着目される。陸上競技短距離で 100m 競技の平均速度より 200m 競技の平均速度の方が早いということはないであろう。距離が長くなればなるほど体力の消耗が大きくなり平均速度が落ちるのが普通である。しかし、スピードスケート競技では 500m 競技より 1000m 競技の平均速度が早い結果になっている。500m 競技ではスタートのところで 0 から最高速度に加速するのに時間を要するが、さらに 500m 滑って 1000m に達する段階ではトップ速度で回りきることができるため、平均速度が滑走距離が 2 倍長いのに平均速度は大きくなり得るのである。陸上競技の 100m が 10 秒程度であるから平均速度は 10m/s であり、スピードスケートの速度 12~15m/s は世界最速の競技といえよう。

#### パシュート (pursuit) の不思議

スピードスケートパシュート競技は 3 人が団体となって滑る団体戦である。最後尾の走者のゴールがタイムとなる。滑走中に先頭走者が何度も入れ替わりながら滑るから、一人で滑走する場合に比べると滑走速度は遅くなると思われがちだ。しかし、結果は同じ距離を一人で滑る記録を上回るから不思議である。なぜ、3 人が集団で滑る方が個人が一人で滑る時の最高記録を上回るのだろうか。それは空気抵抗にある。先頭走者の受ける空気抵抗は一人で滑る場合と変わらないのであろうが、先頭走者の背後を滑る二人の選手が受ける空気抵抗は著しく小さくなる。それゆえ後続の選手は同じ距離を滑っても体力を温存できることになる。そのようなわけで体力を温存した選手が次々に先頭を担うことにより、高速滑走を維持し、好記録を産むのである。

## 23. 氷雪の摩擦研究の系譜

### 氷雪の摩擦研究の系譜

1886	J.Joly	圧力融解・水潤滑説の提唱
1887	Bottomley	圧力融解の実験(復氷)
1899	O.Reynolds	圧力融解・水潤滑説
1924	Harrington	カーリングの摩擦とカール
1936	中谷宇吉郎	雪粒のコロ説
1939	F.P.Bowden and T.P.Hughes	摩擦融解・水潤滑説
1948	A.E.Bell	スケートの理論
1950	T.H.McConica	水蒸気潤滑説
1951	W.A.Weyl	疑似液体膜潤滑説
1953	F.P.Bowden	摩擦融解・水潤滑説続報
1954	C.D.Niven	水分子回転(ころ)説
	Jellinek	疑似液体膜の粘性の測定
1954	T.R.Butkovich	氷の硬さの測定
1962	藤岡敏夫	摩擦融解, 低温癒着説
1968	Schulz, Knappwast	力学的緩和過程の摩擦
1969	対馬勝年・吉田順五	摩擦融解の実験
1970	小林禎作ら	スケートの滑り試験
1971	P.Banes, Tabor and Walker	クリープ
1976	Evans, Nye and Cheeseman	摩擦融解・水潤滑説の発展
		熱解析理論の導入
1976	対馬勝年	凝着説提案
1977	K.Tusima	凝着説, 単結晶氷の摩擦
1981	Ambach and Mayr	スキー滑走中の水膜厚測定
1982	Oksanen	摩擦熱に基づく理論(熱解析)
1986	Akkok, McC Elttes and Calabrese	熱解析理論の発展
1997	Colbeck ら	スケート滑走面温度測定
2000	対馬勝年ら	単結晶氷スケートリンク(氷筍リンク)
2001	対馬勝年	摩擦融解説の論理的矛盾を指摘
2004	対馬勝年	カーリングリンクの高速化構想
2005	対馬勝年	雪面の雪粒結晶方位制御構想
2012	対馬勝年	復氷過程の滑り、水膜の粘性、水膜厚さの推定

## 参 考 文 献

### 1. 参考図書

1. 曾田範宗, 1971: 摩擦の話. 岩波新書, 214 頁.  
(わが国における摩擦研究の大家による名著)
2. F.P.ボウデン/D.テイバー - 著, 原康夫訳, 1974: 摩擦の話 (トリボロジー入門). 河出書房.
3. 田中久一郎, 1985: 摩擦のおはなし. 日本規格協会, 249 頁.  
(初心者向けの入門書, 啓蒙書)
4. 河野彰夫: 摩擦の科学. ポピュラーサイエンス, 河出書房. (初心者向け入門書)
5. 木下是雄, 1973: スキーの科学. 中公新書. 232 頁.
6. 曾田範宗訳 (バウデン・テイバー著), 1961: 固体の摩擦と潤滑. 丸善, 332 頁.  
(F.P.Bowden & Tabor: The friction and Lubrication of Solids Part 1  
の日本語訳, 世界的な名著)
7. 筏義人: 表面の科学. 産業図書. (初心者向け入門書)
8. 松永正久監修, 津谷裕子編集, 1987: 固体潤滑ハンドブック. 幸書房, 551 頁.
9. 日本潤滑学会編, 1975: 潤滑ハンドブック. 養賢堂, 1121 頁.
10. F.P. Bowden & D. Tabor, 1971: The Friction and Lubrication of Solids. Part 1, Clarendon Press. 391pp. (摩擦と潤滑に関する世界的な名著)
11. F.P. Bowden & D. Tabor, 1968: The Friction and Lubrication of Solids. Part 2, Clarendon Press. 544pp. (摩擦と潤滑に関する世界的な名著)
12. D. Dowson, 1979: History of Tribology. Longman Group Ltd. 677pp.
13. H. Czichos, 1978: Tribology. Elsevier, 400pp.
14. Ed. J. Halling, 1978: Principles of Tribology. Macmillan Press Ltd. 401pp.
15. 木下是雄・穂坂直弘, 1972: スキーの物理と力学. 日立製作所, 209 頁.
16. 府瀬川健蔵監修, 1983: ワックスの性質と応用. 幸書房, 235 頁.
17. D.M. Gray and D.M. Male, 1891: Handbook of snow. Pergamon Press, 776P.  
(第 19 章 Skiing, 20 章 Mechanics of skis, 707-765P)

## 氷の摩擦に関する文献

### 1. 著書

1. Bowden, F.P. and Tabor, D., 1964 : Friction and Lubrication of Solids . Clarendon Press, Oxford, 337PP.
2. バウデン・テーバー (曾田訳), 1961 : 固体の摩擦と潤滑. 丸善, 332 頁. (1 の訳本である)
3. Bowden, F.P. and Tabor, D., 1964 : Friction and Lubrication of Solids II . Clarendon Press, Oxford, 544PP.
4. 佐藤健児, 1962 : 表面工学概論, 養賢堂, 298 頁.
5. 津谷裕子編集, 松永正久監修, 1978 : 固体潤滑ハンドブック. 幸書房, 551 頁.
6. 日本潤滑学会編, 1970 : 潤滑ハンドブック, 養賢堂, 1121 頁.
7. Dowson, D., 1979 : History of Tribology. Longman, 677pp.
8. 木下是雄・穂坂直弘, 1972 : スキーの物理と力学. 日立製作所.

### 2. 総説・解説

1. 対馬勝年, 1976 : 氷の摩擦機構について. 潤滑, 21 巻, 5 号, 278-294.
2. 対馬勝年, 1988 : 雪氷のトライボロジー. 潤滑, 33 巻, 4 号, 274-279.
3. 対馬勝年, 1994 : スキーとスケートのトライボロジー. トライボロジスト, 39 巻, 1 号, 2-7.
4. 対馬勝年, 1979 : 氷の摩擦. 雪氷, 41 巻, 4 号, 245-251.
5. 対馬勝年, 1986 : 氷質・雪質と滑走. 冷凍, 61 巻, 710 号, 1239-1247.
6. 対馬勝年, 1989 : 氷表面の滑り. 表面科学, 10 巻, 11 号, 941-943.
7. Minnesota University, 1955 : Friction on snow and ice. SIPRE Rep. No.17, 286+78pp.
8. 対馬勝年, 1994 : 雪と氷の計測法－雪氷の摩擦測定法. 日本雪工学会誌, 10 巻, 4 号, 333-339.

### 3. 滑り機構

#### 3.1 摩擦機構

1. Joly, J., 1886 : The phenomena of skating and Professor J. Thomson's thermodynamic relation. Proc. Roy. Dublin Soc. N.S., Vol.5, 453-454. (圧力融解説の提唱)
2. Reynolds, O., 1899 : On the slipperiness of ice. Mem.P roc. Manchester Lit. & Phil. Soc., Vol.43, No.5, 1-7. (圧力融解説, 1901 年の Reynolds の論文集を引用されることが多い)
3. Bowden, F.P. and Hughes, T.P., 1939 : The mechanisms of sliding on ice and snow. Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 172, No. 947, 280-298. (摩擦融解説の提唱)
4. 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. 46pp. (水蒸気潤滑説の提唱)
5. Niven, C.D., 1959 : A proposed mechanism for ice friction. Can. J. Physics. Vol.37, No.3, 247-255. (水分子回転説の提唱)
  6. Schultz, H.H. and Knappwast, A., 1968 : Die Festkörperreibung des Eises als Relaxationseffect. Wear, Vol. 11, No. 1, 3-20. (力学的緩和過程としての摩擦)
  8. 対馬勝年, 吉田順五, 1969 : 氷の摩擦融解. 低温科学, A, 27 輯, 18-30.
  9. Tabor, D. and Walker, J.C.F., 1970 : Creep and friction of ice. Nature, Vol. 228, 137-139. (クリープによる摩擦)
  10. Barnes, P., Tabor, D., and Walker, J.C.F., 1971 : The friction and creep of polycrystalline ice. Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 342, No. 1557, 127-155.
  11. 対馬勝年, 1976 : 単結晶氷の摩擦(1) - 鋼球と氷の(0001)面および(01 $\bar{1}$ 0)面の摩擦に及ぼす荷重, 速度および温度の効果. 潤滑, 22 巻, 8 号, 514-521. (凝着説の提唱)
  12. 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 輯, 1-46.
  13. Tusima, K., 1977 : Friction of a steel ball on a single crystal of ice. J. Glaciol. (Symposium on Applied Glaciology), Vol. 19, No. 81, 225-235. (凝着説)
  14. Colbeck, S.C., 1995 : Pressure melting and ice skating. Amer. J. Phys. Vol. 63, No.10, 888-890.
  15. Makkonen, L., 1994 : Application of a new theory to ice and snow. Annals of Glaciology, Vol. 19, 155-157.
  16. 対馬勝年, 2001 : 氷の摩擦の統一理論とスケート滑走のパラドックス. 寒地技術論文・報告集, Vol. 17, 290-297.
  17. Rosenberg, R., 2005 : Why is ice slippery? Physics Today, December, 50-55.
  18. Tusima, K., 2011 : Adhesion theory for low friction on ice. New Tribological Ways. Ed. Taher Ghrib. Intech. 301-328.

### 3.2 熱解析理論

1. Evans, D.C.B., Nye, J.F. and Cheeseman, K.J., 1976 : The kinetic friction of ice. Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 347, 493-512.
2. Okasanen, P. and Keinonen, J., 1982 : The mechanism of friction of ice. Wear. Vol. 78, 315-324.
3. Akkok, M., MaC. Ettles, C.M. and Calabrese, J.C., 1987 : Parameter affecting the kinetic friction of ice. Transactions of ASME (J. Tribology), Vol. 109, 552-561.

### 3.3 摩擦の荷重, 速度, 温度の依存性

1. Niven, C.D., 1954 : The effect of high loading on the kinetic friction of ice. Can. J. Phys. Vol.32, 782-789.
2. Niven, C.D., 1956 : On the effect of speed on the kinetic friction of some plastic materials on ice. Can. J. Phys. Vol. 34, 362-369.
3. Bowden, F.P., 1953 : Friction on snow and ice. Proc. Roy. Soc. A, Vol. 217, 462-

478.

4. Niven, C.D., 1961 : The frictional of heated bismuth. Can. J. Phys. Vol. 39, 1264-1272.
5. Bowden, F.P. and Rowe, G.W., 1955 : The friction and the mechanical properties of solid krypton. Proc. Roy. Soc., Vol. 228, 1-9.
6. 対馬勝年, 1977 : 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, 温度ならびに摩擦機構としての凝着説 - 低温科学, A, 35 輯, 1-22.
7. 対馬勝年, 1977 : 単結晶氷の摩擦(1) - 鋼球と氷の(001)面および(0110)面の摩擦に及ぼす荷重, 速度および温度の効果 - 潤滑, 22 巻, 8 号, 514-521.

### 3.4. 滑走体の寸法効果

1. 対馬勝年, 1977 : 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こし強さの温度, 速度, 荷重依存. 低温科学, 物理篇, 35 輯, 23-33.
2. 対馬勝年, 1978 : 単結晶氷の摩擦(2) - 滑走体の寸法効果. 潤滑, 23 巻, 1 号, 45-50.

### 3.5. 摩擦の異方性

1. 対馬勝年, 1977 : 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, 掘り起こし強さの異方性. 低温科学, 物理篇, 35 輯, 35-46.
2. 対馬勝年, 1978 : 単結晶氷の摩擦(3) - 結晶方位による摩擦係数(3) - 結晶方位による摩擦係数, 摩擦痕幅, 掘り起こしの異方性. 潤滑, 23 巻, 10 号, 728-733.
3. Tusima, K., 1978 : Anisotropy of the kinetic friction on a single crystal of ice. J. Glaciol., Vol.2 1, No. 85, 66-668. (Symp. Physics and Chemistry of Ice)

## 4. 薄い水膜に関するもの

1. Jellinek, H.H.G., 1960 : Some frictional properties of thin films. SIPRE Spec. Rep. No.37, 12pp.
2. 笹田直, 上条謙二郎, 1969 : せまいすきまの流れ(第 1,2 報). 潤滑, 14 巻, 6 号, 287-295, 296-301.
3. Nakamura, T., 1966 : A water-like film produced by pressure on the surface of ice crystals. Physics of Snow and Ice. Part 1, 247-258. (Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.)
4. 対馬勝年, 吉田順五, 1969 : 氷の摩擦融解. 低温科学, 物理篇, 27 輯, 17-30.

## 5. スキー

1. Colbeck, S.C., 1988 : The kinetic friction of snow. J. Glaciology. Vol.34, No.116, 78-86.
2. Baurle, L., Kaempfer, U., Szabo, D. and Apencer, N.D.. 2007 : Sliding friction of polyethylene on snow and ice: Contact area and modeling. Cold Region Science and Technology, Vol. 47, 276-289.



## 6. スケート

1. Bell, A.E., 1948 : Theory of skating. *Nature*, Vol.161, 391-392.
2. 小林禎作, 北原武道, 中尾正義, 進士康信, 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 輯, 243-259.
3. 古島昭雄, 1972 : スケートの摩擦抵抗に関する研究. *雪氷*, 34 巻, 1 号, 9-14.
4. Kobayashi, T., 1973 : Studies of the properties of ice in speed-skating rinks. *ASHRAE Journal*, January, 51-56.
5. Evans, C.D.B., Nye, J.F. and Cheeseman, K.J., 1976 : The kinetic friction of ice. *Proc. Roy. Soc. Lond., A*, Vol. 347, 493-512.
6. Koning, J.J.de, Groot, G.de and Ingenschenau, G.J.van, 1992 : Ice friction during speed skating. *J. Biomechanics*. Vol. 25, No. 6, 565-571.
6. Colbeck, S.C., 1995 : Pressure melting and ice skating. *Am. J. Phys.* Vol. 63, No. 10, 888-890.
7. Colbeck, S.C., Najarian, L. and Smith, H.B., 1997 : Sliding temperature of ice skates. *Am. J. Phys.*, Vol. 65, No. 6, 488-492.
8. 対馬勝年, 結城匡啓, 木内敏裕, 下平昌兵, 2000 : 氷結晶面コントロールによる高速スケートリンクの開発. *トライボロジスト*, 45 巻, 1 号, 72-78.
9. 対馬勝年, 木内敏裕, 1998 : 高速スケートリンクの開発. *雪氷*, 60 巻, 5 号, 349-356.
10. 対馬勝年, 2002 : スケートリンクの開発. *トライボロジスト*, 47 巻, 2 号, 72-78.
11. 納口恭明, 2010 : スピードスケートパシュート競技における雪崩の法則. 第 26 回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告概要集 2010, 98.

## 7. 海氷の摩擦

1. 対馬勝年, 田畑忠司, 1978 : 北極圏海氷調査 V - 海氷と各種材料間の摩擦の測定. *低温科学, 物理篇*, 36 輯, 141-161.
2. 対馬勝年, 1979 : 海氷の摩擦について. *潤滑*, 24 巻, 6 号, 361-362.

## 8. タイヤの摩擦

1. Niven, C.D., 1955 : On the friction of rubber covered wheels on ice. *Can. J. Technology*, Vol. 33, 204-210.
2. Niven, C.D., 1958 : On the friction of inflated rubber tires on ice. *Can. J. Phys.* Vol. 36, 599-610.
3. Savkoor, .R., 1965 : On the friction of rubber. *Wear*, Vol. 8, 227-237.
4. 市原薫, 1970 : 路面のすべり抵抗に関する研究(2)雪氷路面の滑りにつて。北海道開発局土木研究所報告 138 号, 19-68.
5. Southern, E. and R.W. Walker, 1972 : Friction of rubber on ice. *Nature Physical Science*, Vol. 237, 142-144.
6. 高橋毅, 1974 : 雪氷路面のすべり摩擦係数. 北海道開発局土木試験所報告, 第 16 号, 59-75.
7. Roberts, A.D. and Richardson, J.C., 1981 : Interface study of rubber - ice friction.

Wear, Vol. 67, 55-69.

8. 加来照俊, 中辻隆, 藤原隆, 萩原亨, 小野寺雄輝, 1986: 札幌市内における冬期間の滑り抵抗値について. 第2回寒地技術シンポジウム'86講演論文集, 463-468.
9. 下村忠一, 酒井洋一, 1986: タイヤの摩擦に関する室内実験. 第2回寒地技術シンポジウム'86講演論文集, 457-462.
10. 堀内数, 1987: 札幌市の厳冬期における路面のすべりに関する調査. 第3回寒地技術シンポジウム'87講演論文集, 93-98.
11. 清水健一, 池谷忠司, 荒井豊, 1988: 雪氷路用タイヤの室内試験 第1報試験機の開発と供試氷結路面の特性. 自動車技術会論文集, No. 38, 71-77.
12. 清水健一, 池谷忠司, 1989: 雪氷路面用タイヤの室内試験 第2報 全制動試験についての一考察. 自動車技術会論文集, No. 40, 121-127.
13. 清水健一, 二瓶光弥, ドレミ・フランソワ, 1991: 雪氷路面用タイヤの室内試験 第4報 制動時 $\mu - S$ 特性とヒステリシス. 自動車技術会論文集, Vol. 22, No. 2, 91-96.
14. 清水健一, 二瓶光弥, 1992: 雪氷路面用タイヤの室内試験 第6報 氷の構造とタイヤの氷上性能. 自動車技術会論文集, Vol. 23, 103-108.
15. 二瓶光弥, 清水健一, エマニュエル・ドゥース, 1994: 氷の表面電気抵抗率とタイヤの氷上性能. 現象の解明と測定上の問題点について. 自動車技術会論文集, Vol. 25, No. 2, 103-108.
16. 二瓶光弥, 清水健一, 1995: タイヤの氷上性能における氷の性状の影響. 氷中のイオン濃度と摩擦の成分について. 第11回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集, Vol. 11, 370-377.
17. 二瓶光弥, 清水健一, 1999: タイヤの氷上特性の実車試験と室内試験の創刊について. 寒地技術論文・報告集, Vol. 15, 99-104.
18. 二瓶光弥, 清水健一, 2000: 氷上におけるタイヤの $\mu - S$ 特性のヒステリシスについて. 寒地技術論文・報告集, Vol. 16, 376-381.
19. 細谷尚弘, 金田安弘, 新谷陽子, 永田泰浩, 石川信敬, 西村浩一, 2005: 歩道のつるつる路面に関する室内実験. 第21回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集, Vol.21, 710-715.
20. 二瓶光弥, 2006: 氷の性状とタイヤの氷上性能. 表面科学, Vol.27, No.2, 116-119.
21. 二瓶光弥, 松井隆, 加藤義隆, 2006: タイヤの氷上性能へのトレッド表面粗さの影響. 寒地技術論文・報告集, Vol.22, 147-152.
22. Higgins, D.D., Marmo, B.A., and Jeffree, C.E., 2008: Morphology of ice wear from rubber-ice friction tests and its dependence on temperature and sliding velocity. Wear, Vol. 265, 634-644.
23. 池澤尚徳, 二瓶光弥, 2012: タイヤと氷の摩擦メカニズムに関する一考察. 第28回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文・報告集, Vol. 28, 271-276.

## 9. カーリング

1. Harrington, L.E., 1924: An experimental study of the motion of curling stones.

- Proc. and Trans. Roy. Soc. Canada, Vol. 18, Sect. 3, 247-259.
2. エド・ルクウィッチ, リック・フォーク, ポール・ゴウセン著 岩崎まさみ訳, 1985 : ザ・カーリングブック. ぎょうせい, 118 頁.
  3. 小林宏, 1986 : カーリング. 冷凍, 61 巻, 710 号, 1269-1273.
  4. 益子正文, 1998 : カーリング. トライボロジスト. 43 巻, 1 号, 38-42.
  5. Shegelski, M.R.A., R.Niebergall, and M.A. Walton, 1996 :  
The motion of curling rock. Can. J. Phys. Vol. 74, 663-670.
  6. Denny, M., 1998 : Curling rock dynamics. Can. J. Phys. Vol. 76, 295-304.
  7. Shegelski, M.R.A., and Reid, M., 1999 : Comment on : – the motion of a curling rock: inertial vs. noninertial reference frames. Can. J. Phys. Vol. 77, No. 11, 903-922.
  8. Denny, M., 1999 : Reply to comment on : Curling rock dynamics – The motion of curling rock: inertial vs. noninertial reference frames.  
Can. J. Phys. Vol. 77, 923-926.
  9. Shegelski, R.A., Reid, M. and Niebergall, R. 1999 : The motion of rotating cylinders sliding on pebbled ice. Can. J. Phys., Vol. 77, No. 11, 847-862.
  10. Shegelski, M.R.A., 2000 : The motion of a curling rock: Analytical approach.  
Can. J. Phys., Vol.78, No.9, 857-864.
  11. Denny, M., 2002 : Curling rock dynamics: Towards a realistic model.  
Can. J. Phys. Vol. 80, No. 9, 1005-1014.
  12. Jensen, E.T. and Shegelski, M.R.A., 2004 : The motion of curling rocks :  
Experimental investigation and semi-phenomenological description.  
Can. J. Phys., Vol. 82, 791-809.
  13. Bradley, J.L., 2009 : The sports of curling. A practical review.  
J. Sports Science and Medicine, Vol. 8, 495-500.
  14. Maeno, 2010 : Curling mechanism of a curling stone on ice pebbles.  
Bulletin of Glaciological Research, No. 26, 1-6.
  15. 前野紀一, 2010 : カーリングと氷物性. 雪氷, 72 巻, 3 号, 181-189.
  16. 対馬勝年, 2011 : カーリング・ストーンの曲がりの説明について.  
雪氷, 73 巻, 3 号, 165-172.
  17. 対馬勝年, 2011 : (討論) 左右摩擦異方性がカールをもたらす仕組みおよび摩擦と摩擦力についての補足. 雪氷, 73 巻, 6 号, 405-407.
  18. 対馬勝年, 2012 : カーリング・ストーンのカール機構.  
寒地技術論文・報告集, Vol. 28, 337-342.

#### 10. 氷の付着強さ, 剪断強さ

1. Jellinek, H.H.G., 1957 : Adhesive properties of ice. SIPRE Res .Rep. No.3 8, 20pp.
2. Relaty, L.E. and Tabor, D., 1958 : The adhesion and strength properties of ice.  
Proc. Roy. Soc. A, Vol.2 45, 184-201.
3. Landy, M. and Freiburger, A., 1967 : Studies of ice adhesion 1 – adhesion of ice

to plastics. J. Colloid and Interface Scie. Vol. 25, 231-244.

4. Jellinek, H.H.G., 1970 : Ice adhesion and abhesion: A survey. Symp. on snow removal and ice control research, 46-78. or CRREL Spec. Rep. No. 115.
5. Finlayson, J.N., 1927 : Test on the strength of ice. Canadian Engineer, Vol. 53, 101-103.
6. Butkovich, T.R., 1954 : Ultimate strength of ice. SIPRE Res. Rep. No. 11, 12pp.
7. 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 輯, 33-43.
8. 対馬勝年, 1980 : プラスチック球と単結晶氷の摩擦. 潤滑, 25 卷, 7 号, 450-457.

#### 11. 氷の硬さ

1. Butkovich, T.R., 1954 : Hardness of single ice crystals. SIPRE Res. Rep. No. 12, 12pp.
2. Barnes, P. and Tabor, D., 1966 : Plastic flow and pressure melting in the deformation of ice I. Nature, Vol. 210, 878-882.
3. Barnes, P. and Tabor, D., 1968 : Plastic flow and pressure melting in regelation in the deformation of ice I. IASH Pub. No.7 9, 303-315.
4. Offenbacher, E.L. and Roselman, I.C., 1971 : Hardness anisotropy of single crystal of ice Ih. Nature Phys. Scie., Vol. 234, No. 49, 112-113.

#### 12. 札幌冬季オリンピック関係

1. The Society of Ski Science, 1971 : Scientific study of skiing in Japan. 141pp. Hitachi. Ltd.

索引

<b>A</b>		<b>J</b>		棚橋良次	35-6
Akkock	90,91,136	Jellinek	25,57,61,82	対馬勝年	グラビア 1-5,19,21, 55-6,80,82,86-7,95,110-1,136
Arnold-Arabief	57	Joly	はしがき 1,15,55,86,136	津谷裕子	24
Ambach	87,92,93,136	<b>K</b>		テルミティウス	4
アモントン	4	Keinonen	108	<b>W</b>	
<b>B</b>		Kelvin	15	Walker	55,87,136
バーシュ	4	Knappwost	136	Weinberg	55
Bass	57	黒岩大助	28,57	Weyl(ワイル)	19,21,56,136
Barnes	55,80,86-88,136	小林禎作	グラビア 3,はしがき 3, 40-2,136	ウエットラウファー	21
Binning	10	河村俊行	57	若浜五郎	57
Bowden	はしがき 1, 3,12,1317-8, 21,36,55,58,80,82,86,104-6,136	<b>L</b>		Whitehead	58
Brill	57	Landy	82	渡部	32
<b>C</b>		Loughborough	82	<b>Y</b>	
Calabrese	90-1,107,136	<b>M</b>		吉田順五	はしがき 2,21,95,136
Cheeseman	88,107,136	Mayr(メイヨ-)	87,92,136		
Colbeck	9	McConica	19,55		
Cuckow	9	McElttes	90-1,136		
クーロン	4,5	<b>N</b>			
<b>D</b>		中谷宇吉郎	はしがき 2,136		
ダ・ビインチ	4	Niven	はしがき 1,19,20,55,58,136		
ダッシュ	4	Nye	88,107,136		
デザグリエ	4	<b>O</b>			
ドコフスコイ	25	大築	33		
Drake	110	Oksanen	93-4,108-9		
<b>E</b>		Ornstein	112		
エーコック (Akkok)	90-1,136	<b>P</b>			
Evans	グラビア 2,55,88,107-8,136	Pfalzner	55		
<b>F</b>		<b>R</b>			
藤岡敏夫	グラビア 1,はしがき 2,3, 12,19,27,32,47-50,109,110,136	Raraty	61,82		
Freiberger	82	Reynolds	はしがき,15,55,61,86,136		
<b>G</b>		Rohrer	10		
Groot	28-9	<b>S</b>			
<b>H</b>		Sallirio	82		
Harrington	はしがき 1,136	Shreve	110		
Hughes	3,18,21,55,61,86,105,136	Shultz	136		
<b>I</b>		新保正樹	36,51-3		
Ingen Shnau	28,30,32	<b>T</b>			
		Tabor	12,55,58,61,80,82		

## 24. スピードスケート競技の記録

### スピードスケート世界記録の変遷

男子 500m 世界記録の変遷	女子 500m 世界記録の変遷
37 <sup>s</sup> 00 クリコフ (ソ連) 1975 メデオ	7 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> 52 シェーネ (東ドイツ) 1984 メデオ
36 <sup>s</sup> 91 クリコフ (ソ連) 1981 メデオ	7 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> 82 シェーネ (東ドイツ) 1985 サラエボ
36 <sup>s</sup> 57 ペコフ (ソ連) 1983 メデオ	7 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 45 エリック (東ドイツ) 1986 カイトウス
36 <sup>s</sup> 55 トメツ (米国) 1987 ヘレンフェイン	7 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 99 エリック (東ドイツ) 1986 メデオ
36 <sup>s</sup> 45 マイ (東ドイツ) 1988 カガリ	7 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 36 ファンヘニツ (オランダ) 1987 ヘレン フェイン
36 <sup>s</sup> 43 マイ (ドイツ) 1992 タホス	7 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 13 ファンヘニツ (オランダ) 1988 カガリ
36 <sup>s</sup> 41 ジャンセン (米国) 1992 タホス	7 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 29 ニーマン (ドイツ) 1993 ハーマル
36 <sup>s</sup> 02 ジャンセン (米国) 1993 カガリ	7 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 26 ニーマン (ドイツ) 1994 カガリ
35 <sup>s</sup> 92 ジャンセン (米国) 1993 ハーマル	6 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 61 ヘビシュタイン (ドイツ) 1998 エムウエーブ
35 <sup>s</sup> 76 ジャンセン (米国) 1994 カガリ	6 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 91 ヘビシュタイン (ドイツ) 2002 ソルトレーク
35 <sup>s</sup> 39 清水宏保 (日本) 1996 カガリ	
34 <sup>s</sup> 82 清水宏保 (日本) 1998 カガリ	
34 <sup>s</sup> 42 フィッツラントルフ (米国) 2002 ソルトレーク	
34 <sup>s</sup> 30 加藤条治 (日本) 2005 ソルトレーク	

男子 1,000m 世界記録の変遷	男子 10,000m 世界記録の変遷
1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 63 堀井学 (日本) 1997 カガリ	14 <sup>m</sup> 3 <sup>s</sup> 92 カルスタート (ノルウェー) 1987 ヘレン フェイン
1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 63 ホス (オランダ) 1997 カガリ	13 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 51 カルスタート (ノルウェー) 1987 カガリ
1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 42 李 (韓国) 1997 カガリ	13 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 20 タスタフソン (スウェーデン) 1988 カガリ
1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 16 ウォサースフーン (カナダ) 1997 カガリ	13 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 54 コス (ノルウェー) 1991 ヘレン フェイン
1 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup> 60 フシヤール (カナダ) 1998 カガリ	13 <sup>m</sup> 30 <sup>s</sup> 55 コス (ノルウェー) 1994 ハーマル
1 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup> 09 ウォサースフーン (カナダ) 1999 カガリ	13 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 33 コス (オランダ) 1998 エムウエーブ
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 66 ウォサースフーン (カナダ) 1999 カガリ	13 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> 71 コス (オランダ) 1998 カガリ
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 55 ホス (オランダ) 1999 カガリ	13 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 40 コス (オランダ) 2000 ヘレン フェイン
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 49 ウォサースフーン (カナダ) 2000 カガリ	12 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 92 アイトデハーゲ (オランダ) 2002 ソルトレーク シテイ
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 35 ウォサースフーン (カナダ) 2000 カガリ	
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 34 アイルランド (カナダ) 2001 カガリ	
1 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup> 28 ウォサースフーン (カナダ) 2001 ソルトレーク	
1 <sup>m</sup> 7 <sup>s</sup> 72 ウォサースフーン (カナダ) 2001 ソルトレーク	
1 <sup>m</sup> 7 <sup>s</sup> 18 ファンフェルデ (オランダ) 2002 ソルトレーク	

カルガリー(カナダ 1988)オリンピックの記録

☆世界新記録 ◎五輪新記録 ○日本新記録

500m(男子)	1000m(男子)
①メイ(東独) ☆ 36 <sup>s</sup> 45	①グリュエフ(ソ連) ◎ 1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 03
②イケマ(オランダ) ◎ 36 <sup>s</sup> 76	②メイ(東独) ◎ 1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 11
③黒岩彰(国土計画) ◎ 36 <sup>s</sup> 77	③ゼレゾフスキー(ソ連) 1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 19
⑨金浜泰光(ジャスコ) ◎ 37 <sup>s</sup> 25	⑨金浜泰光(ジャスコ) ◎ 1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 36
⑪黒岩康志(専大) ◎ 37 <sup>s</sup> 34	⑬浜谷公宏(ミズノ) ◎ 1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 43
⑬浜谷公宏(ミズノ) ◎ 37 <sup>s</sup> 38	⑳黒岩彰(国土計画) ◎ 1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 05
1500m(男子)	5000m(男子)
①ホフマン(東独) ☆ 1 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 06	①グスタフソン(スウェーデン) ☆ 6 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup> 63
②フライム(米) ☆ 1 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 12	②フィセル(オランダ) ☆ 6 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 92
③ハチエフ(オーストリア) ☆ 1 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 31	③ケムケルス(オランダ) ☆ 6 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup> 92
⑤青柳徹(日体大) ◎○ 1 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 85	⑭青柳徹(日体大) ◎○ 6 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> 70
⑯黒岩宗久(専大) ◎ 1 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> 42	27 黒岩宗久(専大) ◎ 7 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 55
10000m(男子)	
①グスタフソン(スウェーデン) ☆ 13 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 20	
②ハチエフ(オーストリア) ☆ 13 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> 11	
③フィセル(オランダ) ☆ 14 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> 55	
500m(女子)	1000m(女子)
①ブレア(米) ☆ 39 <sup>s</sup> 10	①ローテンブルガー(東独) ☆ 1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 65
②ローテンブルガー(東独) ☆ 39 <sup>s</sup> 12	②カニア(東独) ☆ 1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 70
③カニア(東独) ☆ 39 <sup>s</sup> 24	③ブレア(米) ☆ 1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 31
⑤橋本聖子(富士急) ◎○ 39 <sup>s</sup> 74	⑤橋本聖子(富士急) ◎○ 1 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 75
⑧房野妙子(西武不動産) ◎ 40 <sup>s</sup> 01	⑪房野妙子(西武不動産) ◎ 1 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 47
1500m(女子)	3000m(女子)
①ファンニッポ(オランダ) ◎ 2 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup> 68	①ファンニッポ(オランダ) ☆ 4 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 94
②カニア(東独) ◎ 2 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup> 82	②エーリック(東独) ☆ 4 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 09
③エーリック(東独) ◎ 2 <sup>m</sup> 1 <sup>s</sup> 49	③ツァンゲ(東独) ◎ 4 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 92
⑥橋本聖子(富士急) ○ 2 <sup>m</sup> 4 <sup>s</sup> 38	⑦橋本聖子(富士急) ◎○ 4 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> 29
	⑯関タツエ(三協精機) ○ 4 <sup>m</sup> 29 <sup>s</sup> 77
5000m(女子)	
①ファンニッポ(オランダ) ☆ 7 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 13	
②エーリック(東独) ☆ 7 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 12	
③ツァンゲ(東独) 7 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 61	
⑥橋本聖子(富士急) ○ 7 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> 43	
⑯関ナツエ(三協精機) ○ 7 <sup>m</sup> 47 <sup>s</sup> 43	

第54回国体 1999.1.29 (Mウェーブ, 氷筍リンク)

(31 競技中 26 競技で大会新が作られた)

成年男子	500m	38 <sup>s</sup> 93	千葉浩次	◎大会新
少年女子	500m	39 <sup>s</sup> 85	大菅小百合	◎大会新
少年男子	500m	37 <sup>s</sup> 07	沢 友和	◎大会新
少年男子	1000m	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 19	小林正暢	◎大会新
少年男子	1000m	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 37	湯田 淳	◎大会新
成年男子	1000m	1 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 90	宮坂雅昭	◎大会新
少年女子	1000m	1 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 12	上原寿香	◎大会新
成年女子	1000m	1 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> 55	土屋一子	◎大会新
少年女子	1500m	2 <sup>m</sup> 06 <sup>s</sup> 73	小原悠里	◎大会新
少年男子	1500m	1 <sup>m</sup> 51 <sup>s</sup> 61	小林正暢	◎大会新
成年女子	1500m	2 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 83	小林加苗恵	◎大会新
成年男子	1500m	2 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 78	宮坂雅昭	◎大会新
少年男子	2000m リレ-	2 <sup>m</sup> 27 <sup>s</sup> 29	長野	◎大会新
少年女子	2000m リレ-	2 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup> 60	北海道	◎大会新
成年女子	2000m リレ-	2 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 05	長野	◎大会新
少年男子	5000m	6 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup> 74	平子裕基	◎大会新
成年男子	5000m	6 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 08	平間茂英	◎大会新
少年男子	10000m	13 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 93	宮崎今佐人	◎大会新
成年男子	10000m	13 <sup>m</sup> 47 <sup>s</sup> 05	井出良直	◎大会新

1997年12月21日 全日本スプリント (エムウェーブ)

500m (男子)		1000m (男子)		5000m (男子)	
①山影博明	36 <sup>s</sup> 33	①清水宏保	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 50	野崎貴裕	6 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> 80
②井上純一	36 <sup>s</sup> 44	②宮部保範	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 65	(ロメ	6 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> )
③黒岩敏幸	36 <sup>s</sup> 55	③野明弘幸	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 83		
④西岡	36 <sup>s</sup> 62	④笹渕	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 01		
⑤清水宏保	36 <sup>s</sup> 69	⑤黒岩敏幸	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 11		
⑥高橋	36 <sup>s</sup> 72	⑥西岡	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 34		
500m (女子)		1000m (女子)		3000m (女子)	
①岡崎朋美	39 <sup>s</sup> 24	①三宮恵利子	1 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 31	根本奈美	4 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 08
②島崎京子	39 <sup>s</sup> 78	②岡崎朋美	1 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 64		
③楠瀬志保	39 <sup>s</sup> 81	③野崎千春	1 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 66		
④三宮恵利子	39 <sup>s</sup> 92	④島崎京子	1 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 00		
⑤香川真由実	40 <sup>s</sup> 23	⑤長岡	1 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 83		
⑥清水	40 <sup>s</sup> 31	⑥香川真由実	1 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 98		



長野冬季オリンピック 1998（スピードスケート）の記録

500m（男子）		1000m（男子）		1500m（男子）	
①清水	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 35	①ホ <sup>ス</sup> マ	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 64	①センテ <sup>ロ</sup> ル	● 1 <sup>m</sup> 47 <sup>s</sup> 87
②ウオザ <sup>ス</sup> フ <sup>ン</sup>	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 84	②ホ <sup>ス</sup>	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 71	②ホ <sup>ス</sup> マ	1 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 13
③オハ <sup>ラ</sup> ント	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 86	③清水	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 00	③リツマ	1 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 52
④S <sup>フ</sup> シャル	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 00	④レ <sup>ワ</sup> ン	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 26	④ホ <sup>ス</sup>	1 <sup>m</sup> 49 <sup>s</sup> 75
⑤P <sup>フ</sup> シャル	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 05	⑤S <sup>フ</sup> シャル	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 29	⑤フ <sup>テ</sup> イェット	1 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> 04
⑥フィツラント <sup>ル</sup>	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 20	⑥ウオザ <sup>ス</sup> フ <sup>ン</sup>	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 39	⑥ヘルスマン	1 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> 31
⑦金	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 36	⑦フィツラント <sup>ル</sup>	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 64	⑦野明	1 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> 49
⑧李	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 55	⑧フ <sup>テ</sup> イェット	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 75	⑧青柳	1 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> 68
⑬堀井	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 78	⑪今井	1 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 96	⑯今井	1 <sup>m</sup> 51 <sup>s</sup> 70
⑮山影	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 91	⑰堀井	1 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 40		●世界新記録
5000m（男子）		10000m（男子）		スピードスケートはスラップスケートが使われた初の五輪となり、1500m以上の男女5種目で世界新記録が生まれた。 屋外リンクでは自然との戦いもあった。初の屋内リンク開催となった1988年カルガリー大会は8種目に世界新記録が誕生した。	
①ロメ	● 6 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 20	①ロメ	● 13 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 33		
②リツマ	6 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> 24	②テ <sup>ヨ</sup> ンク	13 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup> 76		
③フェルトカフ	6 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> 31	③リツマ	13 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> 19		
④テ <sup>ヨ</sup> ンク	6 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 37	④フェルトカフ	13 <sup>m</sup> 29 <sup>s</sup> 69		
⑤テ <sup>イ</sup> トリヒ	6 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup> 17	⑤スト <sup>レ</sup> リ	13 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup> 95		
⑥クハ <sup>ン</sup> ラウ	6 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup> 21	⑥テ <sup>イ</sup> トリヒ	13 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 58		
⑦白幡	6 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 71	⑦サレ	13 <sup>m</sup> 42 <sup>s</sup> 94		
⑧スト <sup>レ</sup> リ	6 <sup>m</sup> 37 <sup>s</sup> 12	⑧フ <sup>テ</sup> イェット	13 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup> 03		
⑰野崎	6 <sup>m</sup> 42 <sup>s</sup> 30	⑰白幡	13 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 45		

男子 10,000m でコス（ノルウェー）世界記録を 15 秒 22 縮めたオランダのジャンニ・ロメは普通は 8 歩で滑る直線部を 6 歩で滑る。オランダは前回のリレハンメル五輪で金はゼロであった。それから 4 年 8 歩から 6 歩へ縮めた 2 歩にスケート王国のプライドがある（朝日新聞、西山良太郎による）。

長野冬季オリンピック 1998（スピードスケート）の記録（続き）

500m（女子）		1000m（女子）		1500m（女子）	
①ルメイ・ト <sup>ン</sup>	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 60	①タイムル	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 51	①タイムル	● 1 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 58
②オーク	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 93	②ウイッティ	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 79	②ニ <sup>ー</sup> マン	1 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 66
③岡崎	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 01	③ルメイ・ト <sup>ン</sup>	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 37	③ウイッティ	1 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 97
④シェンク	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 45	④フェルカ <sup>ー</sup>	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 54	④フニヤテ <sup>イ</sup>	1 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 19
⑤島崎	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 68	⑤ト <sup>ー</sup> マス	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 95	⑤フリ <sup>ー</sup> ジ <sup>ン</sup> ガ <sup>ー</sup>	1 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 20
⑥タイムル	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 15	⑥ B <sup>・</sup> サント <sup>ス</sup> トロム	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 23	⑥ト <sup>ー</sup> マス	1 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 29
⑦フェルカ <sup>ー</sup>	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 19	⑦岡崎	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 27	⑦ハ <sup>ッ</sup> ピシュタ <sup>イン</sup>	1 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 46
⑧ガルブ <sup>レ</sup> ヒト	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 45	⑧三宮	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 36	⑧ト <sup>リ</sup> ケ <sup>ス</sup>	2 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> 97
⑩三宮	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 56	⑩楠瀬	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 82	⑩野崎	2 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 78
⑫楠瀬	1 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 80	⑫島崎	1 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 49	⑫外ノ池	2 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 84

●世界新記録

3000m（女子）		5000m（女子）	
①ニ <sup>ー</sup> マン	4 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 29	①ハ <sup>ッ</sup> ピシュタ <sup>イン</sup> ●	6 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 61
②ハ <sup>ッ</sup> ピシュタ <sup>イン</sup>	4 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> 47	②ニ <sup>ー</sup> マン	6 <sup>m</sup> 69 <sup>s</sup> 65
③フリ <sup>ー</sup> ジ <sup>ン</sup> ガ <sup>ー</sup>	4 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 44	③ブ <sup>ロ</sup> カシエ <sup>ワ</sup>	7 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 14
④ト <sup>リ</sup> ケ <sup>ス</sup>	4 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 64	④テ <sup>ー</sup> ロル	7 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup> 81
⑤フニヤテ <sup>イ</sup>	4 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 01	⑤テ <sup>ー</sup> ヨンク <sup>グ</sup>	7 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 77
⑥ホルム	4 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 24	⑥セ <sup>ー</sup> イルストラ	7 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 89
⑦ブ <sup>ロ</sup> カシエ <sup>ワ</sup>	4 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 23	⑦ホルム	7 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 20
⑧ト <sup>ー</sup> マス	4 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 38	⑧フニヤテ <sup>イ</sup>	7 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 23
⑭上原	4 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 92	⑩上原	7 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 72
⑰野崎	4 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 60	⑮根本	7 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 77
⑱宗像	4 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 72		

1992年フランスで開催のアルペールビル大会では屋外リンクであったため、世界新ゼロ、再度室内リンクとなった1994年のリレハンメルでは4種目で世界新記録が更新された。1998年の室内リンク長野では5種目で世界新記録が更新された。

ソルトレークシティオリンピック 2002 では 16 人が従来の世界記録を上回り、10 種目中 8 種目に世界記録が樹立された。（ ）内は従来の世界記録

男子	1,000m	ファンフェルト <sup>グ</sup>	オランダ <sup>グ</sup>	● 1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 18	(1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 72)
	1,500m	ハ <sup>ッ</sup> ラー	米国	● 1 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 95	(1 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup> 20)
	5,000m	アイトデ <sup>グ</sup> ハーケ <sup>グ</sup>	オランダ <sup>グ</sup>	● 6 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 66	(6 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 72)
	10,000m	アイトデ <sup>グ</sup> ハーケ <sup>グ</sup>	オランダ <sup>グ</sup>	● 12 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 92	(13 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 40)
女子	1,000m	ウイッティ	米国	● 1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 83	(1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 06)
	1,500m	フリ <sup>ー</sup> ジ <sup>ン</sup> ガ <sup>ー</sup>	ト <sup>ッ</sup> イ	● 1 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> 02	(1 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> 38)
	3,000m	ハ <sup>ッ</sup> ピシュタ <sup>イン</sup>	ト <sup>ッ</sup> イ	● 3 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 70	(3 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 26)
	5,000m	ハ <sup>ッ</sup> ピシュタ <sup>イン</sup>	ト <sup>ッ</sup> イ	● 6 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 91	(6 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 44)

ソルトレークオリンピック 2002 の記録

男 子 500m			
①	ケーシー・フィッツランドルフ (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 23	(34 <sup>s</sup> 42, 34 <sup>s</sup> 81) 五輪新
②	清水宏保 (日本)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 26	(34 <sup>s</sup> 61, 34 <sup>s</sup> 65)
③	カーペンター (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 47	(34 <sup>s</sup> 68, 34 <sup>s</sup> 79)
④	ファンフェルト (オランダ)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 49	(34 <sup>s</sup> 72, 34 <sup>s</sup> 77)
⑤	李 (韓国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 60	(34 <sup>s</sup> 74, 34 <sup>s</sup> 85)
⑥	チーク (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 60	(34 <sup>s</sup> 74, 34 <sup>s</sup> 85)

男 子 1,000m		男 子 1,500m	
①	ヘラルト・ファンフェルト (オランダ) ●	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 18	① テレク・ハーラー (米国) ●
②	ホース (オランダ)	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 53	② アイトヘーハーゲ (オランダ)
③	チーク (米国)	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 61	③ センテロール (ノルウェー)
④	カーペンター (米国)	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 89	④ チーク (米国)
⑤	ペンネルス (オランダ)	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 95	⑤ ホーストマ (オランダ)
⑥	ピアソン (米国)	1 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 97	⑥ ピアソン (米国)

男 子 5,000m		男 子 10,000m	
①	アイトヘーハーゲ (オランダ) ●	6 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 66	① アイトヘーハーゲ (オランダ) ●
②	ハーラー (米国)	6 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 98	② ロメ (オランダ)
③	ホーテン (ドイツ)	6 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 73	③ サトレ (ノルウェー)
④	シエル (ロシア)	6 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 85	④ 白幡圭史 (日本)
⑤	ブーティエット (米国)	6 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 97	⑤ ホーテン (ドイツ)
⑥	フェルハイエン (オランダ)	6 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup> 71	⑥ シエル (ロシア)

女 子 500m			
①	カトリオナ・ルメイ・トーン (カナダ)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 75	(37 <sup>s</sup> 30, 37 <sup>s</sup> 45)
②	ガルブレヒト・エンフェルト (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 94	(37 <sup>s</sup> 34, 37 <sup>s</sup> 60)
③	フェルカー (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 19	(37 <sup>s</sup> 62, 37 <sup>s</sup> 57)
④	ノイト (オランダ)	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 37	(37 <sup>s</sup> 54, 37 <sup>s</sup> 83)
⑤	コチュガ (ベラルーシ)	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 39	(37 <sup>s</sup> 73, 37 <sup>s</sup> 66)
⑥	岡崎明美 (日本)	1 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup> 64	(37 <sup>s</sup> 77, 37 <sup>s</sup> 87)

女 子 1,000m		女 子 1,500m	
①	クリス・ウイッティ (米国) ●	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 83	① フリージンガー (ドイツ) ●
②	フェルカー (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> 96	② フェルカー (ドイツ)
③	ロドリゲス (米国)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 24	③ ロドリゲス (米国)
④	ティメル (オランダ)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 45	④ クラッセン (カナダ)
⑤	フリージンガー (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 47	⑤ ウイッティ (米国)
⑥	ガルブレヒト・エンフェルト (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 60	⑥ ヘビシュタイン (ドイツ)

ソルトレーク五輪 2002 の記録 (続き)

女 子 3,000m			女 子 5,000m		
①	ヘビシユタイン (ドイツ)	● 3 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 70	①	ヘビシユタイン (ドイツ)	● 6 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 91
②	フルネウオルト (オランダ)	3 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 94	②	スミット (オランダ)	6 <sup>m</sup> 49 <sup>s</sup> 22
③	クラッセン (カナダ)	3 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 97	③	ヒューズ (カナダ)	6 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> 53
④	フリーソングァー (ドイツ)	3 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 39	④	クラッセン (カナダ)	6 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> 89
⑤	デヨング (オランダ)	4 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> 49	⑤	ハリスエワ (ロシア)	6 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> 97
⑥	田畑真紀 (日本)	4 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 63	⑥	フリーソングァー (ドイツ)	6 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 39

トリノ五輪 (2006) の記録

男 子 500m			
①	ゾイ・チーク (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 76	(34 <sup>s</sup> 82, 34 <sup>s</sup> 94)
②	ドロフエワ (ロシア)	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 41	(35 <sup>s</sup> 24, 35 <sup>s</sup> 17)
③	李康* (韓国)	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 43	(35 <sup>s</sup> 34, 35 <sup>s</sup> 09)
④	及川佑 (日本)	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 56	(35 <sup>s</sup> 35, 35 <sup>s</sup> 21)
⑤	干鳳桐 (中国)	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 68	(35 <sup>s</sup> 39, 35 <sup>s</sup> 29)
⑥	加藤条治 (日本)	1 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 78	(35 <sup>s</sup> 59, 35 <sup>s</sup> 19)

女 子 500m			
①	ジュロワ (ロシア)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 57	(38 <sup>s</sup> 23, 38 <sup>s</sup> 34)
②	王曼利 (中国)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 78	(38 <sup>s</sup> 31, 38 <sup>s</sup> 47)
③	任慧 (中国)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 87	(38 <sup>s</sup> 60, 38 <sup>s</sup> 27)
④	岡崎朋美 (日本)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 92	(38 <sup>s</sup> 46, 38 <sup>s</sup> 46)
⑤	李相花 (韓国)	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 04	(38 <sup>s</sup> 69, 38 <sup>s</sup> 35)
⑥	ウオルフ (ドイツ)	1 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 27	(38 <sup>s</sup> 70, 38 <sup>s</sup> 56)

男 子 1,000m			男 子 1,500m		
①	シャニー・デービス (米国)	1 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> 89	①	エンリコ・ファブリス (イタリア)	1 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup> 97
②	チーク (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 16	②	デービス (米国)	1 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 13
③	ベソネルス (オランダ)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 32	③	ハトリック (米国)	1 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 22
④	李 (韓国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 37	④	カイヘルス (オランダ)	1 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 58
⑤	ホース (オランダ)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 42	⑤	ベソネルス (オランダ)	1 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 71
⑥	ハトリック (米国)	1 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 45	⑥	スコブレ (ロシア)	1 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 91

世界記録 デービス 1<sup>m</sup>07<sup>s</sup>03

世界記録 ハトリック 1<sup>m</sup>42<sup>s</sup>78

トリノ五輪の記録（続き）

女 子 1,000m			女 子 1,500m		
①ティメル	(オランダ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 05	①クラッセン	(カナダ)	1 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> 27
②クラッセン	(カナダ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 09	②グーロフス	(カナダ)	1 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> 74
③フリージンガー	(ドイツ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 11	③ブスト	(オランダ)	1 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> 90
④ブスト	(オランダ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 39	④フリージンガー	(ドイツ)	1 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 31
⑤グーロフス	(カナダ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 54	⑤シミオナート	(イタリア)	1 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 76
⑥デロー	(オランダ)	1 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 73	⑥ロビシエワ	(ロシア)	1 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 87

世界記録 クラッセン 1<sup>m</sup>51<sup>s</sup>79

女 子 3,000m			女 子 5,000m		
①ブスト	(オランダ)	4 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 43	①ヒューズ	(カナダ)	6 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 07
②フルネウオルト	(オランダ)	4 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 48	②ヘビシユタイン	(オランダ)	7 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> 08
③クラッセン	(カナダ)	4 <sup>m</sup> 04 <sup>s</sup> 37	③クラッセン	(カナダ)	7 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> 57
④フリージンガー	(ドイツ)	4 <sup>m</sup> 04 <sup>s</sup> 59	④サブリコハ	(チェコ)	7 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 38
⑤ヘビシユタイン	(ドイツ)	4 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup> 54	⑤アンシュツ	(カナダ)	7 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 95
⑥アンシュツ	(ドイツ)	4 <sup>m</sup> 06 <sup>s</sup> 89	⑥グーロフス	(カナダ)	7 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 95

男 子 5,000m			男 子 10,000m		
①チャト・ハトリック	(米国)	6 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> 68	①ホフ・デヨング	(オランダ)	13 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 57
②クラマー	(オランダ)	6 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 40	②ハトリック	(米国)	13 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup> 40
③ファブリス	(イタリア)	6 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 25	③フェルハイエン	(オランダ)	13 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> 80
④フェルハイエン	(オランダ)	6 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup> 84	④グラトウム	(ノルウェー)	13 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 58
⑤ダソカース	(カナダ)	6 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 26	⑤サトル	(ノルウェー)	13 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 93
⑥デヨング	(オランダ)	6 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 12	⑥スコブレフ	(ロシア)	13 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 54

世界記録 ハトリック 12<sup>m</sup>55<sup>s</sup>11

第 11 回冬季オリンピック札幌大会 (1972) の記録

男子 500m				男子 1500m			
①	ケラー Erhard Keller	Ger	39 <sup>s</sup> 44 OR	①	シャエンク Ard Schenk	Hol	2 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 96 OR
②	ベルエス Hasse Borjes	Swe	39 <sup>s</sup> 69 OR	②	グレンボル Roar Gronvold	Nor	2 <sup>m</sup> 04 <sup>s</sup> 26
③	ムラトフ Valeri Mouratov	URS	39 <sup>s</sup> 80 OR	③	クレッソン Goran Classon	Swe	2 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup> 89
④	ビヨラン Per Bjorang	Nor	39 <sup>s</sup> 91 OR	④	トベテル Bjorn Tveter	Nor	2 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup> 94
⑤	ハンニネン Seppo Hanninen	Fin	40 <sup>s</sup> 12	⑤	ボルス Jan Bols	Hol	2 <sup>m</sup> 06 <sup>s</sup> 58
⑥	リンコベシ Leo Linkovesi	Fin	40 <sup>s</sup> 14	⑥	ラブリュシキン Valeri Lavrouchkin	URS	2 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 16

男子 5000m				男子 10,000m			
①	シェンク Art Schenk	Hol	7 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> 61	①	シェンク Ard Schenk	Hol	15 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 35 OR
②	グレンボル Road Gronvold	Nor	7 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup> 18	②	フェルケルク Cees Verkerk	Hol	15 <sup>m</sup> 04 <sup>s</sup> 70 OR
③	ステンセン Sten Stensen	Nor	7 <sup>m</sup> 33 <sup>s</sup> 39	③	ステンセン Sten Stensen	Nor	15 <sup>m</sup> 07 <sup>s</sup> 08 OR
④	クレッソン Goran Classon	Swe	7 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 17	④	ボルス Jan Bols	Hol	15 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 99 OR
⑤	ウルセン Willy Olsen	Nor	7 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> 47	⑤	ラブリュシキン Valeri Lavrouchkin	URS	15 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 08 OR
⑥	フェルケルク Cees Verkerk	Hol	7 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> 17	⑥	クレッソン Goran Claessonon	Swe	15 <sup>m</sup> 30 <sup>s</sup> 19

女子 500m				女子 1000m			
①	ヘニング Anne Henning	USA	43 <sup>s</sup> 33 OR	①	ブルーク Monika Pflug	Ger	1 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 40 OR
②	クラスノワ Vera Krasnova	URS	44 <sup>s</sup> 01 OR	②	ケレンデルストラ Atje Keulen-Deelstra	Hol	1 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 61 OR
③	チトワ Ludmila Titova	URS	44 <sup>s</sup> 45 OR	③	ヘニング Anne Henning	USA	1 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 02 OR
④	ヤング Sheila Young	URS	44 <sup>s</sup> 53 OR	④	チトワ Ludmila Titova	URS	1 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup> 85 OR
⑤	ブルーク Monika Pflug	Ger	44 <sup>s</sup> 75 OR	⑤	スタトケビチ Nina Statevitch	URS	1 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup> 21 OR
⑥	ケレンデルストラ Atje Keulen-Deelestra	Hol	44 <sup>s</sup> 89 OR	⑥	ホルム Dianne Holum	USA	1 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup> 41 OR

女子 1500m				女子 3000m			
①	ホルム Dianne Holum	USA	2 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 85 OR	①	バースカイザー Stien Baas-Kaiser	Hol	4 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 14 OR
②	バースカイザー Stien Baas-Kaiser	Hol	2 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 05 OR	②	ホルム Dianne Holum	USA	4 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 67
③	ケレンデルストラ Atje Kelen-Deelstra	Hol	2 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 05 OR	③	ケレンデルストラ Atje Keulen-Deelstra	Hol	4 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 91
④	ドブロム Elly Van De Brom	Hol	2 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 27 OR	④	ティヘラル Sippie Tigchlaar	Hol	5 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 67
⑤	タウパデル Rosemrie Taupadel	GDR	2 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 35OR	⑤	スタトケビチ Nina Statkevitch	URS	5 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 79
⑥	スタトケビチ Nina Statkevych	URS	2 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> 19	⑥	セリョギナ Kapitolina Sereguina	URS	5 <sup>m</sup> 01 <sup>s</sup> 88

歴代冬季五輪開催都市と競技種目数

開催年	開催地国	種目数	開催年	開催地国	種目数
1 1924	シャモニー・モンブラン (仏)	14	12 1976	インスブルック (オーストリア)	37
2 1928	サンモリッツ (スイス)	14	13 1980	レークプラシッド (米)	38
3 1932	レークプラシッド (米)	14	14 1984	サラエボ (ユーゴスラビア)	39
4 1936	ガルミッシュ・パルテンキルヘン (独)	17	15 1988	カルガリ (カナダ)	46
5 1948	サンモリッツ (スイス)	22	16 1992	アルベールビル (仏)	57
6 1952	オスロ (ノルウェー)	22	17 1994	リレハンメル (ノルウェー)	61
7 1956	コルチナダンペッツォ (伊)	24	18 1998	長野 (日)	68
8 1960	スコパレ (米)	27	19 2002	ソルトレーク (米)	78
9 1964	インスブルック (オーストリア)	34	20 2006	トリノ (伊)	84
10 1968	グルノーブル (仏)	35	21 2010	バンクーバー (カナダ)	
11 1972	札幌 (日)	35	22 2014	ソチ (ロシア)	
			23 2018	(韓国)	

500m 男子		1500m 男子		5000m	10000m
1924	C. ジェトロウ (米) 44.0s	C. ツンベルグ (フィンランド)	2 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 8	8 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> 0	18.04.8
1928	C. ツンベルグ (フィンランド) <b>43.4s</b>	C. ツンベルグ (同上)	2 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> 0	8 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> 5	中止
	B. エベルセン (ノルウェー) 43.4s				
1932	J.A. シーア (米) 43.4s	J.A. シーア (米)	2 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup> 5	9 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> 8	19.13.6
1936	L. バングルード (ノルウェー) 43.4s	C. マーティセン (ノルウェー)	2 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 2	8 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 6	17.24.3
1948	F. ヘルゲッセン (同上) 43.1s	S. ファーグタッド (ノルウェー)	2 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> 6	8 <sup>m</sup> 29 <sup>s</sup> 4	17.26.3
1952	K. ヘンリー (米) 43.2s	H. アデルセン (ノルウェー)	2 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> 4	8 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 6	16.45.8
1956	J. グリシン (ソ) 40.2s	J. グリシン (ソ)	<b>2<sup>m</sup>08<sup>s</sup>6</b>	7 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> 7	16.35.9
		J. ミハイロフ (ソ)	2 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> 6		
1960	J. グリシン (ソ) 40.2s	R. アース (ノルウェー)	2 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 4	7 <sup>m</sup> 51 <sup>s</sup> 3	<b>15.46.6</b>
		J. グリシン (ソ)	2 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 4		
1964	R. マクダーモット (米) 40.1s	A. アントソン (ソ)	2 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 3	7 <sup>m</sup> 38 <sup>s</sup> 4	15.50.1
1968	E. ケラー (西独) 40.3s	C. フェルケルク (オランダ)	2 <sup>m</sup> 03 <sup>s</sup> 4	7 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup> 4	15.23.6
1972	E. ケラー (西独) 39.44s	A. シェンク (オランダ)	2 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 96	7 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> 61	15.01.35
1976	E. クリコフ (ソ) 39.17s	J. ストックホルム (ノルウェー)	1 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 38	7 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup> 48	<b>14.50.59</b>
1980	E. ハイデン (米) 38.03s	E. ハイデン (米)	1 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> 44	7 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> 29	<b>14.28.13</b>
1984	S. フォキチュフ (ソ) 38.19s	G. ブッシュ (加)	1 <sup>m</sup> 58 <sup>s</sup> 36	7 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> 28	14.39.90
1988	J. メイ (東独) 36.45s	A. オフマン (東独)	1 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> 06	6 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup> 63	13.48.20
1992	J. メイ (ドイツ) 37.14s	J. コス (ノルウェー)	1 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> 81	6 <sup>m</sup> 59 <sup>s</sup> 97	14.12.12
1994	A. ゴルベフ (ロシア) 36.33s	J. コス (ノルウェー)	1 <sup>m</sup> 51 <sup>s</sup> 29	6 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> 96	13.30.55
1998	1.11.35		1.47.87	6.22.20	13.15.33





T=-19℃, GI No.3 SBN0.5 (直径 6.4mm) (1010) 速度効果・荷重効果

速度 m/s	荷重,kgf (1010)										
	0.044	0.099	0.144	0.295	0.395	0.545	0.795	1.045	1.600	2.200	3.100
1.8x10 <sup>-3</sup>	0.035	0.032	0.033	0.028	0.024	0.025	0.031	0.033	0.030	0.034	0.045
	0.036	0.032	0.033	0.033	0.033	0.030	0.032	0.034	0.041	0.046	0.052
	0.035	0.036			0.033	0.032	0.033	0.035			
3.7x10 <sup>-4</sup>	0.028	0.034	0.041	0.025	0.025	0.028	0.030	0.052	0.036	0.039	0.050
	0.041	0.041		0.037	0.027	0.040	0.031	0.054	0.055	0.063	0.063
					0.038	0.0484	0.054				
7.4x10 <sup>-5</sup>	0.069	0.052	0.050	0.047	0.022	0.032	0.044	0.050	0.057	0.059	0.067
	0.066	0.055	0.056		0.053	0.040	0.045	0.068			
	0.071	0.057			0.054	0.042	0.066				
1.5x10 <sup>-5</sup>	0.049	0.039	0.048	0.049	0.062	0.048	0.074	0.051	0.065	0.075	0.105
	0.054	0.044	0.056	0.064	0.080	0.066	0.078	0.073			
	0.079		0.078			0.069		0.087			
	0.102										
1.2x10 <sup>-6</sup>	0.017	0.047	0.036	0.088		0.087	0.100	0.116	0.122	0.142	
	0.108	0.079				0.093	0.114				
							0.120				

No.30 S50.10.13 荷重効果 T=-10℃ V=1.8x10<sup>-3</sup>m/s GINo.3-SBNo.4

W, kgf	$\mu_{p(1010)}$	再 クラック	$\phi$ ,mm	$\mu_{h(0001)}$	再 クラック	$\phi$ ,mm
0.044	0.005	× ×		0.002	× ×	
0.099	0.008	× ×		0.006	× ×	
0.144	0.009	× ×		0.005	× ×	
0.295	0.009	× ×		0.004	× ×	
0.395	0.009	× ×		0.005	× ×	
0.545	0.011	× ×		0.008	× ×	0.204
0.795	0.012	× ×	0.370	0.010	× ×	0.257
1.045	0.014	× ×	0.389	0.013	× 少	0.370
1.600	0.022	× ×	0.500	0.019	カスカ 少	0.444
2.200	0.026	カスカ 少	0.630	0.024	カスカ 著	0.519
3.100	0.035	少 著	0.741	0.034	少 著	0.611, 0.759

No.32 S50.10.14 荷重効果 T=-10℃ V=1.5x10<sup>-5</sup>m/s GINo.3-SBNo.4

W, kgf	$\mu_{p(1010)}$	再 クラック	$\phi$ ,mm	$\mu_{h(0001)}$	再 クラック 層	$\phi$ ,mm
0.044	0.011	× ×		0.007	× ×	
0.099	0.022	× ×	0.153	0.012	× ×	
0.144	0.034	カスカ ×	0.163	0.021	× ×	
0.295	0.041	○ カスカ	0.315	0.023	× ×	
0.395	0.047	○ ×	0.382	0.025	× ×	
0.545	0.052	○ ×	0.497	0.024	× ×	
0.795	0.062	○ ○	0.593	0.027	× ×	
1.045	0.072	○ ○		0.026	× ×	
1.600	0.076	著 著	0.793	0.030	少 ×	0.631
2.200	0.089	著 著	0.905	0.051	○ 著	0.860
3.100	0.108	著 著	1.377	0.070	○ 少 少	1.147

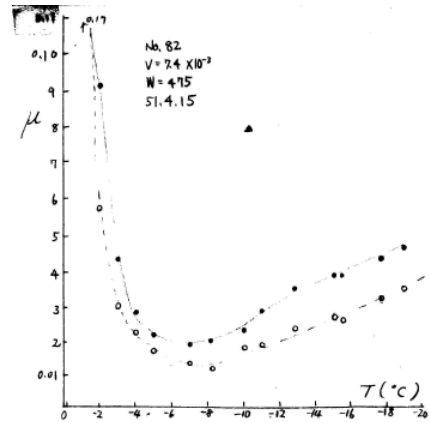
No.38 S50 速度効果・荷重効果 T=-19℃, NGI No.3-SB No.5

W,kgf	V1.8x10 <sup>-3</sup> m/s		3.7x10 <sup>-4</sup>		7.4x10 <sup>-5</sup>		1.5x10 <sup>-5</sup>	
	$\mu_{(1010)}$	$\mu_{(0001)}$	$\mu_{(1010)}$	$\mu_{(0001)}$	$\mu_{(1010)}$	$\mu_{(0001)}$	$\mu_{(1010)}$	$\mu_{(0001)}$
0.044	0.037	0.029	0.041	0.026	0.069	0.059	0.054	0.032
0.099	0.032	0.021	0.040	0.021	0.055	0.041	0.039	0.018
0.144	0.033	0.023	0.041	0.021	0.050	0.038	0.078	0.041
0.295	0.028	0.015	0.037	0.018			0.064	0.047
0.395	0.024	0.012	0.038	0.021			0.080	0.033
0.545	0.030	0.019	0.048	0.024	0.058	0.034	0.069	0.030
0.795	0.031	0.019	0.054	0.023	0.066	0.034	0.078	0.036
1.045	0.033	0.021	0.054	0.026	0.068	0.029	0.087	0.044
1.600	0.030	0.022	0.036	0.023	0.057	0.027	0.065	0.032
2.200	0.034	0.027	0.039	0.028	0.059	0.035	0.075	0.031
3.100	0.045	0.033	0.050	0.035	0.067	0.036	0.105	0.036

No.82 S.51.4.15 (14<sup>h</sup>~22<sup>h</sup>30<sup>m</sup>) 温度効果

V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s, W=0.475kgf 165° 1/3-1(1/10-1), 2cm/M スライド-直径 6.4mm

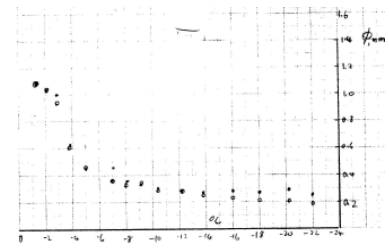
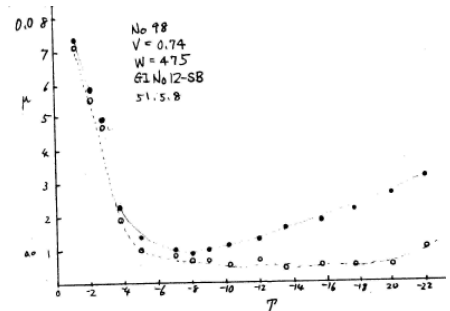
水温, °C	気温, °C	$\mu_{K(10\bar{1}0)}$		$\phi$ , mm	$\mu_{K(0001)}$		$\phi$ , mm				
		min	max		min	max					
-1.5	-0.5	0.171	0.122	0.234	再ナ	2.997	0.182	0.219	0.152	ナ	2.997
-2	-1	0.091	0.082	0.109	クラック	2.180	0.058	0.055	0.064	ナ	1.444
-3	-2	0.043	0.040	0.046	再少	0.925	0.030	0.027	0.033	ナ	0.851
-4	-3	0.028	0.026	0.030	再少	0.657	0.022	0.019	0.025	ナ	0.597
-5	-4	0.021	0.020	0.022	再	0.537	0.017	0.016	0.019	ナ	0.493
-7	-6	0.019	0.016	0.022	再著	0.388	0.013	0.012	0.015	ナ	0.358
-8.2	-7.2	0.020	0.016	0.023		0.313	0.011	0.008	0.014	ナ	0.300
-10	-9	0.023	0.020	0.026			0.018	0.016	0.020	ナ	
-11	-10	0.029	0.026	0.032	再	0.300	0.019	0.016	0.023	ナ	0.209
-12.8	-12.1	0.035	0.032	0.037	再	0.300	0.024	0.021	0.026	ナ	0.201
-15.2	-14.2	0.038	0.036	0.041	再	0.283	0.027	0.026	0.032	ナ	0.179
-15.5	-14.6	0.038	0.036	0.041	再	0.269	0.026	0.023	0.029	ナ	0.179
-17.8	-17	0.043	0.040	0.046	再	0.269	0.032	0.029	0.036	ナ	0.179
-19	-19	0.046	0.043	0.047	再	0.284	0.035	0.031	0.037	ナ	0.172



No.98 S51.5.8 温度効果

V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s, W=0.475kgf, GINo.12-SB, 記録紙送り 60cm/min

水温, °C	気温, °C	$\mu_{(10\bar{1}0)}$		$\phi$ , mm	$\mu_{(0001)}$		$\phi$ , mm	時刻		
		min	max		min	max				
-22	-22	0.031	0.029	0.033	0.252	0.010	0.010	0.011	0.191	14 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup>
-20	-19	0.026	0.026	0.028	0.290	0.005	0.005	0.009	0.206	14 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>
-17.8	-16.3	0.021	0.021	0.023	0.268	0.005	0.004	0.005	0.214	15 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>
-15.8	-14.6	0.018	0.017	0.020	0.275	0.005	0.005	0.006	0.229	15 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>
-13.5	-12.5	0.016	0.015	0.017	0.268	0.004	0.003	0.005	0.252	16 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup>
-12	-11	0.013	0.012	0.015	0.283	0.007	0.007	0.008	0.283	16 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>
-10.2	-9.3	0.011	0.010	0.012	0.306	0.005	0.004	0.005	0.290	17 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>
-9	-8.1	0.010	0.008	0.013	0.329	0.007	0.006	0.008	0.344	17 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>
-8	-7.5	0.009	0.009	0.012	0.336	0.007	0.007	0.008	0.336	18 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>
-7	-6.5	0.010	0.009	0.012	0.359	0.008	0.007	0.009	0.367	18 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>
-5	-4	0.013	0.012	0.015	0.466	0.010	0.009	0.010	0.459	19 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>
-3.8	-2.3	0.022	0.021	0.024	0.619	0.019	0.018	0.021	0.611	19 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>
-2.7	-1.3	0.049	0.046	0.055	1.000	0.047	0.045	0.046	0.940	20 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>
-2.1	-1.2	0.058	0.052	0.064	1.030	0.055	0.052	0.057	1.045	20 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>
-1.3	0.0	0.073	0.070	0.077	1.088	0.071	0.068	0.076	1.088	21 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>

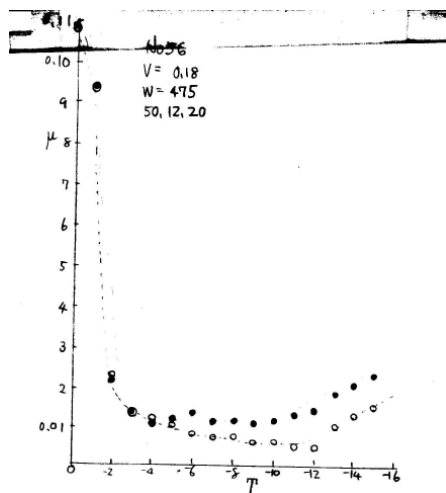


前日の夕方から-3°Cにアニール、朝 9h20m 削る→-3°Cアニール→11<sup>h</sup>00(-10°C)12時より冷却開始、14h00m -22°C→鏡面状

No.56 S50.12.20 温度効果

W=475g(油浸) V=0.18cm/s AINo.2-SB ice sample No.2 (人工氷) - steel ball

温度, °C	$\mu_B(0001)$	$\mu_P(10\bar{1}0)$
-15	0.016	0.024
-14	0.014	0.021
-13	0.011	0.019
-12	0.005	0.015
-11	0.005	0.014
-10	0.006	0.012
-9	0.006	0.011
-8	0.007	0.012
-7	0.007	0.012
-6	0.008	0.014
-5	0.011	0.012
-4	0.012	0.011
-3	0.014	0.014
-2	0.023	0.022
-1	0.094	0.094
0	0.109	0.109



No.104 S51.5.25 寸法効果

T=-11℃, V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s, W=0.475kgf, 2cm/M, 1/10 - 1

R,mm	$\mu_p$	$\phi_p$ ,mm	$\mu_b$	$\phi_b$	1/R	$\phi_p^3/12R$	$\pi(\phi_p/2)^2$	F <sub>exp</sub>	
1.6	0.103	0.343 再	0.082	0.343 再	0.625	0.002	0.092	48.9	p=2209kgf/cm <sup>2</sup>
3.2	0.044	0.299 再	0.022	0.269 再	0.31	0.0007	0.070	20.9	p=2307kgf/cm <sup>2</sup>
4.8	0.032	0.313 再	0.015	0.248 ナシ	0.21	0.0005	0.077	15.2	p=2090kgf/cm <sup>2</sup>
9.5	0.012	0.343 ナシ	0.011	判別困難	0.105	0.00035	0.092	5.7	p=271kgf/cm <sup>2</sup>
12.7	0.010	0.328	0.011	0.373	0.079	0.00023	0.084	4.75	s=5.65kgf/cm <sup>2</sup>

再：再結晶 ナシ：再結晶・クラックなし

No.107 S41.5.25 寸法効果

T=-12℃, V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s, W=0.26kgf, 2cm/M, 1/3 - 1 → 1 - 1

R,mm	$\mu_p$	$\phi_p$ , mm	$\mu_b$	$\phi_b$
1.6	0.077	0.243 再著	0.055	0.236 再著
3.2	0.028	0.228 再少	0.013	0.213 再ナシ
4.8	0.026	0.228 再加効	0.017	判別不可
6.4	0.026	0.228 ナシ	0.024	判別不可
9.0	0.009	0.228 ナシ	0.007	判別不可
12.5	0.014	0.228 ナシ	0.013	判別不可

No.109 S51.5.31 寸法効果

T=-10℃ V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s, W=2.68kgf 1/30 - 1, 2mm/M

$\phi$ ,mm	$\mu_{prism}$	$\phi_{prism}$ ,mm		$\mu_{basal}$	$\phi_{basal}$ ,mm		$\phi_b^3/12R$	$(\pi/4)\phi^2$	F <sub>exp</sub>	
3.2	0.139	1.045	再、クテ、削屑	0.110	0.925	再、ツノ	0.021	0.627	295	p=1372kgf/cm <sup>2</sup>
4.8	0.089	0.970	再、クテ、削屑	0.071	0.880	再、ツノ、削屑	0.1118	0.608	190	p=1553
6.4	0.073	0.896	再	0.055	0.791	再、ツノ	0.0064	0.491	147	p=2191
9.5	0.037	0.791	再	0.015	0.746	再少、ツノ	0.0036	0.437	40.2	p=924
12.7	0.029	0.896	再	0.011	0.746	再なし	0.0027	0.437	29.5	s=6.75kgf/cm <sup>2</sup>

No.111 S51.6.3 温度効果

W=-0.475kg, V=1.5x10<sup>-5</sup>m/s, GINo.12-SB

氷温,℃	気温,℃	$\mu_p$	$\phi_p$	$\mu_b$	$\phi_b$	時刻
-11	-11	0.049	0.433 再・削	0.023	0.403 再削	11 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>
-11	-11	0.050	0.448 再	0.024	0.358 再	11 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>
-7.6	-6.4	0.053	0.537 再	0.021	0.343 再	13 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>
-7.0	-6.4			0.015		14 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>
-5.4	-5.5	0.057	0.567 再	0.018	0.328	14 <sup>h</sup> 36 <sup>m</sup>
-4.7	-3.5	0.036	0.582 再クテ	0.017	0.403	15 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup>
-3.4	-3.0	0.031	0.597 再	0.022	0.522	16 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup>
-3.0	-3.0	0.033	0.612 端再	0.026	0.552	16 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>
-2.4	-2.0	0.041	0.746 端再	0.042	0.761	17 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup>
-1.6	-1.0	0.062	1.090 再	0.057	1.030	18 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup>
-1.0	-1.0	0.084	1.463	0.061	1.343	18 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup>
-0.7	-0.5	0.122	3.000	0.134	3.000	19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>

No.127 51.10.23 寸法効果

T=-11℃ V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s W=0.475kgf 2cm/M

R,mm	$\mu_p$	$\phi_p$	s	F <sub>s</sub>	1/R mm <sup>-1</sup>	p
1.6	0.136	0.351	0.385	0.0044	0.625	13.4
3.2	0.048	0.260	0.537	0.0024	0.31	22.3
5.2	0.035	0.290	0.315	0.0030	0.19	17.4
6.4	0.023	0.473	0.078	0.008	0.156	1.06
9.5	0.012	0.305	0.098	0.0033	0.105	4.82
12.7	0.011	0.382	0.057	0.0052	0.079	

prism plane  
s=0.057  
p=17.7kgf/mm<sup>2</sup>

R,mm	$\mu_s$	$\phi_p$	s	$F_s$	1/R mm <sup>-1</sup>	p
1.6	0.079	0.366	0.446	0.0037	0.625	6.62
3.2	0.022	0.305	0.179	0.0035	0.31	4.70
5.2	0.016	0.290	0.144	0.0024	0.19	6.65
6.4	0.018	0.305	0.146	0.0026	0.156	8.05
9.5	0.008	0.275	0.080	0.0021	0.105	
12.7	0.008	0.336	0.045	0.0032	0.079	

basal plane  
s=0.045  
p=6.5kgf/mm<sup>2</sup>

No.130 51.11.8 寸法効果

T=-10 °C V=1.5x10<sup>-5</sup> m/s W=0.269kgf GI No.15-SB

Prism 面	R,mm	$\mu_s$	$\phi$ mm	S kgf/mm <sup>2</sup>	$F_s$	p	
	1.6	0.109	0.36	0.36	0.0045	5.11	
3.2	0.037	0.27	0.22	0.0025	7.27		
5.2	0.024	0.26	0.15	0.0023	7.38	$\bar{s}=0.034\text{kgf/mm}^2$	
6.4	0.016	0.21	0.16	0.0015	11.6		
9.5	0.007	0.30	0.033	0.0030			
12.7	0.009	0.33	0.035	0.0038			
12.7(W0.475)	0.033	0.53	0.089 →	S=0.089			

Prism 面	R,mm	$\mu_s$	$\phi$ mm	S kgf/mm <sup>2</sup>	$F_s$	p	
	1.6	0.090	0.30	0.43	0.0039	2.16	
3.2	0.020	0.24	0.15	0.0025	4.0		
5.2	0.016	0.18	0.21	0.0014	15.5	$\bar{s}=0.070\text{kgf/mm}^2$	
6.4	0.013	0.24	0.097	0.0025	2.77		
9.5	0.009	判別不可	0.067	0.0025			
12.7	0.013	0.37	0.076	0.0032			
12.7(W0.475)	0.033	0.90	0.031 →	S=0.031			

$$F_s = k(1/4) \pi \phi^2 s$$

$$p = (F - F_s) 6R / \phi^3$$

No.64 S51.3.24 材質効果 T=-6 °C V=7.4x10<sup>-5</sup> m/s

	W=0.295kgf		W=2.20kgf		2.20kgf s,kgf/cm <sup>2</sup>	0.295kgf s,kgf/cm <sup>2</sup>
	$\mu_s$	$\phi$ ,mm	$\mu_s$	$\phi$ ,mm		
スチール	0.012	0.237	0.039	0.871	14.4	8.03
アクリル	0.014	0.270	0.026	0.790	11.7	7.22
	0.017	0.351				5.18
ポリプロピレン	0.037	0.275	0.049	0.763	23.6	18.4
テフロン	0.059	0.324	0.098	0.817	41.1	21.1
ナイロン	0.070	0.223	0.078	0.790	35.0	52.9
ポリエチレン	0.078	0.267	0.069	0.763	33.2	41.1
スチール			0.037	0.845	14.5	

No.64,65,69 S51.3.24 材質効果 T=-6, -20 °C V=7.4x10<sup>-5</sup> m/s W=0.295kgf, 2.20kgf

	W=0.295kgf(-6 °C)			W=2.20kgf(-6 °C)			W=2.68kgf(-20 °C) $\mu_{k(1010)}$
	$\mu_{k(1010)}$	$\phi$ ,mm	s,kgf/cm <sup>2</sup>	$\mu_{k(1010)}$	$\phi$ ,mm	s,kgf/cm <sup>2</sup>	
スチール SB	0.012	0.237	8.0	0.039	0.871	14.4	0.029
				0.037	0.845		
テフロン PTFE	0.059	0.324	21.1	0.098	0.817	41.1	0.040, 0.027
アクリル PMMA	0.014	0.270	7.2	0.026	0.790	11.7	0.048
	0.017	0.351					
ポリエチレン PE	0.078	0.267	41.1	0.069	0.763	33.2	
ポリプロピレン	0.037	0.275	18.4	0.049	0.763	23.6	0.089
ナイロン Nylon	0.070	0.223	52.9	0.078	0.817	32.7	0.146

No.17 S52.12.13 材質効果(10 $\bar{1}0$ ) <11 $\bar{2}0$ > T=-5℃ V=1.8x10<sup>-3</sup>m/s R=6.4mm

W,kgf	0.044	0.083	0.013	0.026	0.475
TC	0.0056	0.007	0.009	0.011	0.012
PTFE	0.045	0.050	0.061	0.055	0.047
PMMA	0.033	0.025	0.014	0.009	0.008
			0.016		
PE	0.075	0.075	0.059	0.059	0.052
Nylon	0.077	0.075	0.069	0.067	0.059
PP	0.089	0.067	0.056	0.043	0.031
Derlin	0.064	0.063	0.064	0.062	0.069

No.P.18 S52.12.14 材質効果(0001) T=-5℃ V=1.8x10<sup>-3</sup>m/s R=3.2mm 清浄 P:プラスチック球スライダー

W,kgf	0.044	0.083	0.130	0.260	0.475
TC	0.016	0.017	0.017	0.018	0.030
アルミナ	0.043	0.042	0.041	0.043	0.043
PC	0.125	0.118	0.113	0.089	0.061
PTFE	0.088	0.068	0.077	0.077	0.097
PMMA	0.008	0.006	0.013	0.016	
PE	0.064	0.057	0.033	0.033	0.026
Nylon	0.062	0.056	0.047	0.045	0.041
PP	0.110	0.086	0.058	0.052	0.042
ガラス	0.010	0.012	0.013	0.020	0.029

No.P-28 S53.3.22 (0001) T=-10℃, V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s R=6.4mm 2cm/M 荷重効果・材質効果

W kgf	PTFE		Nylon		PMMA	
	$\mu_s$	$\mu_k$	$\mu_s$	$\mu_k$	$\mu_s$	$\mu_k$
0.044	0.113	0.030	0.179	0.079	0.067	0.039
0.083	0.091	0.032	0.184	0.073	0.069	0.031
0.130	0.087	0.031	0.169	0.070	0.051	0.041
0.260	0.080	0.040	0.114	0.068	0.052	0.041
0.475	0.073	0.040	0.128	0.100	0.043	0.025
0.687	0.093	0.043	0.171	0.082	0.035	0.029
0.910	0.105	0.038	0.139	0.071	0.048	0.017
1.375	0.102	0.042	0.143	0.158	0.028	0.024
2.680	0.083	0.052	0.145	0.035	0.020	0.020

No.P-29 S53.3.23 (0001) T=-10℃, V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s R=6.4mm 2cm/M 荷重効果

W kgf	Drilin			PE			ガラス			PP		
	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$
0.044	0.175	0.039		0.183	0.041		0.067	0.148	0.136	0.290	0.074	
0.083	0.141	0.034		0.156	0.042		0.299	0.198	0.191	0.214	0.060	
0.130	0.111	0.037		0.158	0.043		0.291	0.217	0.272	0.110	0.083	
0.260	0.083	0.041	0.518	0.122	0.048			0.177	0.327	0.135	0.075	
0.475	0.084	0.036	0.572	0.097	0.039		0.137	0.141	0.422	0.085	0.041	
0.687	0.115	0.029	0.872	0.108	0.039		0.155	0.126	0.504	0.098	0.047	
0.910	0.087	0.032	0.899	0.192	0.105		0.205	0.171	0.640	0.089	0.042	0.354
1.375	0.091	0.028	1.04	0.073	0.019	0.708	0.146	0.120	0.736	0.067	0.061	0.599
2.680	0.070	0.034	1.55		0.152	1.25	0.278	0.129	0.981	0.101	0.071	0.926

No.P-30 S53.3.24 (0001) 材質効果 T=-5℃ V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s W=0.26kgf, 0.475kgf, 3cm/M, R=6.4mm

W	0.26kgf						0.475kgf					
	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$	A	p	s	$\mu_s$	$\mu_k$	$\phi$	A	p	s
TC	0.020	0.008	0.300	0.071	368	2.90	0.002	0.002	0.463	0.168	282	0.51
PTFE	0.150	0.103	0.409	0.131	198	20.4	0.151	0.082	0.409	0.131	361	29.6
PE	0.167	0.084	0.354	0.098	264	22.1	0.119	0.068	0.463	0.168	281	19.3
Nylon	0.183	0.100	0.409	0.131	198	19.8	0.149	0.109	0.463	0.168	281	30.9
ガラス	0.142	0.077	0.381	0.114	228	17.4	0.012	0.055	0.490	0.188	252	13.8
PMMA	0.022	0.008	0.300	0.071	368	3.05	0.015	0.011	0.381	0.114	417	4.54
Derlin	0.140	0.075	0.545	0.233	111	8.3	0.131	0.064	0.708	0.394	121	7.70
PP	0.060	0.033	0.300	0.071	368	12.2	0.068	0.038	0.463	0.168	282	10.8

$\phi$ :mm 摩擦痕幅  
A:mm<sup>2</sup> 接触面積  
s:kgf/cm<sup>2</sup> 真の接触面の剪断強さ  
p: kgf/cm<sup>2</sup> 真の接触面の圧力

No.P-35 S53.2.28 (0001) 材質効果 T=-25℃ R=6.4mm 2cm/M 荷重効果  
 No.P-35 S53.3.28 (0001) T=-5℃ V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s R=6.4mm

	R6.4 $\mu_k$	R3.2 $\mu_k$
Derlin	0.0519	
PP	0.0238	0.1449
Nylon	0.1022	0.0348
PE	0.0885	0.051
PMMA	0.0488	
PTFE	0.0534	0.0473
TC	0.0137	0.0305

W kgf	PTFE		PMMA		Nylon	
	$\mu_s$	$\mu_k$	$\mu_s$	$\mu_k$	$\mu_s$	$\mu_k$
0.044	0.2096	0.0659	0.0709	0.0265	0.2372	0.0984
0.083	0.1461	0.0642	0.0402	0.0219	0.2108	0.1043
0.130	0.1439	0.0733	0.0440	0.0200	0.2132	0.0933
0.260	0.1242	0.0724	0.0180	0.0083	0.2032	0.0716
0.475	0.1477	0.0574	0.0111	0.0082	0.2010	0.0921
0.687	0.1229	0.0576	0.0185	0.0158	0.1941	0.0693
0.910	0.1228	0.1033	0.0153	0.0126	0.1451	0.0690
1.375	0.1238	0.0797		0.0209	0.147	0.0480
2.680	0.1069	0.0743		0.0343	0.0864	0.0498

No.P-38 S53.11.1 (0001) T=-5℃ V=7.4x10<sup>-5</sup>m/s W=0.269kg R=6.4mm

	F <sub>v</sub> ,gf	$\phi$ ,mm	A,mm <sup>2</sup>	s,kgf/cm <sup>2</sup>
PTFE	46.2	0.362	0.103	44.9
PMMA	2.64	0.261	0.0535	4.93
PE	24.9	0.319	0.0799	31.16
Derlin	17.6	0.667	0.349	5.01
Nylon	35.2	0.551	0.238	14.8
Glass	23.5	0.348	0.0951	24.7

GI No.15-SB 寸法効果、速度効果 温度 T=-5℃、荷重 W=475gf、鏡面状 速度 m/s

(1010) 摩擦係数	球径	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅
	mm	1.8x10 <sup>-3</sup>	mm	3.7x10 <sup>-4</sup>	mm	7.4x10 <sup>-5</sup>	mm	1.5x10 <sup>-5</sup>	mm	1.2x10 <sup>-6</sup>	mm
	1.6	0.0647	0.388	0.0746	0.418	0.0896	0.313	0.1914	0.940	0.2765	0.866
	3.2	0.0273	0.388	0.0387	0.418	0.0401	0.478	0.0881	0.627	0.1550	0.925
	5.2	0.0182	0.418	0.0255	0.448	0.0278	0.433	0.0538	0.552	0.0760	0.776
	6.4	0.0141	0.418	0.0219	0.358	0.0182	0.433	0.0365	0.472	0.0683	0.716
	9.5	0.0100	0.425	0.0141	0.478	0.0109	0.388	0.0214	0.493	0.0492	0.701
	12.7	0.0080	0.425	0.0100	0.448	0.0073	0.388	0.0182	0.492	0.0282	0.642

(0001) 摩擦係数	球径	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅	速度	痕幅
	mm	1.8x10 <sup>-3</sup>	mm	3.7x10 <sup>-4</sup>	mm	7.4x10 <sup>-5</sup>	mm	1.5x10 <sup>-5</sup>	mm	1.2x10 <sup>-6</sup>	mm
	1.6	0.0638	0.388	0.0720	0.418	0.0851	0.462	0.1367	0.672	0.2309	0.925
	3.2	0.0246	0.388	0.0365	0.418	0.0392	0.433	0.0547	0.522	0.1320	0.851
	5.2	0.0146	0.418	0.0241	0.448	0.02751	0.418	0.0228	0.433	0.0775	0.731
	6.4	0.0109	0.418	0.0223	0.348	0.0155	0.588	0.0141	0.388	0.0456	0.672
	9.5	0.0055	0.425	0.0128	0.478	0.0091	0.373	0.0100		0.0355	0.701
	12.7	0.0041	0.425	0.0089	0.448	0.0055	0.373	0.0100	0.382	0.0050	0.418

S53.11

T=-5℃、W=475gf、V=7.4 × 10<sup>-5</sup>m/s 氷球-平面(粗面)

	F <sub>v</sub> , gf	$\mu_k$	A,mm <sup>2</sup>	P,kgf/cm <sup>2</sup>	S <sub>v</sub> (=F <sub>v</sub> /A)
銅(粗面)	8.02-16.45	0.017-0.035	0.43	110	1.91-3.82
真鍮(粗面)	3.46- 6.49	0.007-0.014	0.40	117	0.86-1.61
ステンレス(粗面)	6.93-12.99	0.015-0.027	0.33	146	2.13-4.00
アルミニウム(粗面)	13.42	0.028	0.35	137	3.88
鉄(粗面)	4.33-11.69	0.009-0.025	0.32	147	1.34-3.62
シリコイ(粗面)	9.96-19.48	0.021-0.041	1.14	42	0.88-1.72
シリコイ(粗面)	10.83-17.32	0.023-0.036	0.42	115	2.63-4.20

S51.10 結晶面効果

滑走方向	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
→	0.021	0.021	0.017	0.015	0.015	0.022	0.018	0.048	0.040	0.041
→	0.018	0.021	0.021	0.022	0.017	0.022	0.017	0.052	0.043	0.040
→	0.017	0.016	0.015	0.015	0.014	0.019	0.017	0.032	0.026	0.045
						0.020	0.017	0.032	0.027	0.040
						0.025	0.021	0.034	0.025	0.038
						0.025	0.020	0.034	0.024	0.036
						0.019	0.017	0.035	0.020	0.036
							0.016	0.035	0.038	0.036
←	0.019	0.020	0.020	0.023	0.021	0.013	0.014	0.043	0.043	0.033
←	0.017	0.024	0.022	0.022	0.020	0.013	0.014	0.043	0.043	0.033
←	0.021	0.025	0.021	0.018	0.017	0.017	0.017	0.048	0.048	0.033
	0.013	0.017	0.021	0.022	0.024		0.016	0.047	0.048	0.033
	0.021	0.019	0.016	0.017	0.019	0.014	0.014	0.046	0.037	0.027
						0.013	0.014	0.042	0.035	0.027
						0.014	0.015	0.041	0.038	0.027

S52.6.11 滑り方位効果 (10 $\bar{1}$ 0) T=-10 °C, W=475gf, V=4.5 × 10<sup>-4</sup>m/s, R=2.34mm TCB 1/3-10cm/M

角度	0 //	10	20	30	40	50	60	70	80	90 ⊥	100	110	120	130	140	150
μ	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.047	0.050	0.057	0.057	0.058	0.069	0.070	0.064	0.054	0.053	0.051
φ	0.311	0.302	0.302	0.302	0.302	0.292	0.302	0.292	0.283	0.330	0.264	0.274	0.283	0.274	0.302	0.302
	160	170	180 //	190	200	210	220	230	240	250	2650	270 ⊥	280	290	300	310
	0.051	0.049	0.050	0.050	0.048	0.047	0.047	0.046	0.050	0.050	0.051	0.052	0.047	0.046	0.048	0.041
	0.283	0.263	0.292	0.302	0.302	0.292	0.311	0.283	0.283	0.283	0.283	0.302	0.283	0.264	0.330	0.302
	320	330	340	350			// (0001)面に平行 ⊥ (0001)面に垂直									
	0.040	0.041	0.044	0.046												
	0.302	0.302	0.302	0.283	mm											

S52.6.14 滑り方位効果 (10 $\bar{1}$ 0) T=-10 °C, W=475gf, V=2.5 × 10<sup>-7</sup>m/s, R=6.4mm TCB

	0 //	20	45	70	90 ⊥	180 //	240 ⊥	315	340
μ	0.0881	0.0760	0.0760	0.0912	0.0972	0.0851	0.0972	0.0851	0.0653
φ	0.755	0.66~0.80	0.821		0.802	0.89~0.94		0.75~0.85	

No.50, 51, 52 S50.12.17 結晶面効果、荷重効果 V=7.4 × 10<sup>-3</sup>cm/s, T=-5 °C NGI No.5-SB

W,kgf	μ	0.021	0.023	0.021	0.018	0.024	65°
545	φ	0.447	0.474	0.393	0.405	0.447	
1045	μ	0.031	0.033	0.030	0.029	0.040	65°
→	φ	0.597	0.614	0.597	0.582	0.651	
1600	μ	0.038	0.041	0.032	0.032	0.045	65°
→	φ	0.779	0.764	0.754	0.695	0.833	
	μ		0.039	0.031	0.036	0.043	245°
←	φ	0.710	0.68	0.715	0.808	0.813	
3100	μ	0.084	0.056	0.047	0.052	0.054	65°
→	φ	1.366	1.145	1.147	1.160	1.172	
	μ	0.041	0.046	0.066	0.054	0.050	245°
←	φ	0.993	1.145	1.081	1.103	1.020	

No.54 2 S50.12.19 結晶面効果、荷重効果 V=7.4 × 10<sup>-3</sup> cm/s, T=-10 °C NGI No.5-SB

W,kgf 545	μ 変形	0.030 なし	0.032 再結晶	0.025 なし	0.018 なし	0.029 再結晶	65°
1045 →	μ 変形	0.032 なし	0.044 再クラ	0.027 なし	0.022 再	0.044 再	65°
1045 ←	μ 変形	0.022 なし	0.035 再クラ	0.021 再少	0.021 再	0.044 再	245°
3100 →	μ φ	0.077 1.017	0.070 0.889	0.041 0.843	0.060 0.943	0.081 0.993	65°
3100 ←	μ φ 変形	0.022 0.956 再クラ	0.035 0.845 再クラ	0.021 0.953 再	0.021 0.894 再	0.044 0.951 再 二線	245°

No.58 S51.1.9 結晶面・速度効果 T=-11 °C、W=545gf、NGI No.5-SB No.5

速度,m/s 1.8 × 10 <sup>-3</sup>	65° 245°	0.020 0.017	0.016 0.017	0.014 0.016	0.014 0.017	0.015 0.019
3.7 × 10 <sup>-3</sup>	65° 245°	0.028 0.018	0.022 0.017	0.017 0.017	0.016 0.017	0.017 0.021
7.4 × 10 <sup>-3</sup>	65° 245°	0.029 0.021	0.034 0.029	0.020 0.018	0.014 0.015	0.029 0.034
1.5 × 10 <sup>-3</sup>	65° 245°	0.034 0.021	0.044 0.037	0.025 0.016	0.017 0.014	0.046 0.053
1.2 × 10 <sup>-3</sup>	65° 245°	0.064 0.056	0.064 0.067	0.030 0.067	0.016 0.064	0.072 0.079

No.55 S.50.12.19 氷河水 No.4 T=-10 °C W=2680gf 滑り方位効果

角度	平均	μ <sub>k</sub>	F	角度	平均	μ <sub>k</sub>	F	
0	27-38	28	0.045	44-61	180	36-53	47	0.076
	27-37	28	0.045	44-60	190	38-49	42	0.068
10	27-41	30	0.048	44-66	200	35-46	40	0.065
	27-39	30	0.048	44-63	210	37-49	44	0.072
20	41-51	43	0.069	66-82	220	35-42	38	0.061
30	33-45	40	0.065	53-73	230	30-41	35	0.057
40	36-46	42	0.068	58-74	240	31-39	34	0.055
50	39-52	45	0.073	63-84	250	28-35	32	0.051
60	40-49	45	0.073	65-79	260	29-40	35	0.057
70	42-51	45	0.073	68-82	270	26-32	29	0.047
80	30-42	33	0.053	48-68	280	27-46	33	0.053
90	39-51	44	0.071	63-82	290	28-37	33	0.053
100	29-38	35	0.056	47-61		24-31	27	0.044
110	39-47	43	0.069	63-76	300	27-35	30	0.048
120	37-48	42	0.068	60-78	310	21-33	27	0.052
130	39-48	44	0.071	63-78	320	26-43	32	0.071
140	35-49	39	0.063	57-79	330	24-32	27	0.044
150	42-51	45	0.073	68-82	340	24-34	30	0.048
160	42-56	48	0.078	68-90	350	25-32	28	0.045
170	38-52	47	0.076	61-84				



No.53 S.50.12.18 No.4 - steel ball (氷河氷) T=-5℃ V=7.4 × 10<sup>-5</sup>m/s (1/3 - 1)

滑り方位による摩擦の異方性 滑り方位効果

W = 545gf				W = 1045gf				W = 1045gf			
角度	μ 最小	μ 最大	平均	角度	μ 最小	μ 最大	平均	角度	μ 最小	μ 最大	平均
0	0.025	0.026	0.025	0	0.030	0.037	0.033	190	0.028	0.032	0.030
10	0.024	0.028	0.025	10	0.032	0.037	0.035	200	0.029	0.033	0.031
30	0.025	0.027	0.025		0.033	0.036	0.035	210	0.028	0.033	0.030
60	0.024	0.026	0.025	20	0.029	0.035	0.032	220	0.028	0.033	0.030
90	0.025	0.027	0.026		0.032	0.036	0.035		0.032	0.036	0.032
120	0.025	0.028	0.027	30	0.029	0.035	0.032	230	0.029	0.033	0.032
150	0.025	0.027	0.026		0.026	0.029	0.028	240	0.029	0.033	0.032
180	0.025	0.026	0.025	40	0.028	0.035	0.030		0.028	0.032	0.030
210	0.023	0.024	0.023	50	0.029	0.035	0.031	250	0.029	0.034	0.032
240	0.025	0.026	0.025	60	0.026	0.030	0.028		0.032	0.036	0.033
270	0.025	0.026	0.025	70	0.026	0.032	0.029	260	0.028	0.033	0.031
300	0.025	0.028	0.027	80	0.026	0.032	0.030	270	0.028	0.032	0.030
330	0.026	0.028	0.027	90	0.026	0.030	0.028	280	0.030	0.035	0.032
				100	0.028	0.032	0.030	290	0.028	0.033	0.031
				110	0.023	0.032	0.028	300	0.029	0.035	0.031
				120	0.026	0.032	0.029	310	0.026	0.033	0.029
				130	0.022	0.035	0.027		0.029	0.034	0.032
				140	0.025	0.030	0.028	320	0.029	0.033	0.030
				150	0.025	0.030	0.027	330	0.028	0.033	0.029
				160	0.026	0.032	0.029	340	0.028	0.033	0.028
					0.026	0.033	0.030		0.031	0.036	0.033
				170	0.026	0.030	0.029	350	0.028	0.033	0.031
				180	0.026	0.032	0.029				



著者 対馬勝年

富山大学 名誉教授・客員教授

改訂版発行 2013年7月31日

富山大学理工学研究部（理学）

〒930-8555 富山市五福3190

電話 076-445-6646（直通）

E-mail [tusima@sci.u-toyama.ac.jp](mailto:tusima@sci.u-toyama.ac.jp)

