

ポピュラーサイエンス

氷表面の滑り

対馬 勝年

富山大学理学部 〒930 富山市五福 3190

(1989 年 11 月 6 日 受理)

Sliding on Ice Surface

Katutosi TUSIMA

Faculty of Science, Toyama University
Gofuku 3190, Toyama 930

(Received November 6, 1989)

氷の滑りの関与する身近の問題と、各種の氷の摩擦説を紹介し、最後に氷の摩擦に関する最新の話題について述べた。

1. はじめに

ある年の 11 月、予想外の雪に見舞われた札幌で革靴が雪に対していかによく滑るかを教えられた。滑る雪道にいやがうえにも神経が張り詰めた。そのとき防寒靴を履いた地元の人たちが雪を楽しむように闊歩しているのを見て、材質による滑りの違いを痛感させられた。同じような例として、滅多に雪の降らない地域でも、夜間の放射冷却で凍結した氷の面に足をとられ冷汗をかけた経験を持つ人もいるであろう。

荘厳な大理石で出来た階段や歩道も雪が降ると困る。踏みつけた靴の底で雪が滑ってしまうからである。氷化したツルツルの路面や水溜りの氷も危険である。特に、水溜りのふちの氷は、水で洗われツルツルの面と化しているので極めてよく滑る。

これらの滑りに関する身近な体験は、ややもすると解け水が雪や氷の滑りの原因であると結論されがちだ。

屋根の雪もよく滑る。日中に気温が高くなって雪と屋根材との凍着がゆるんでくると、屋根雪が滑り落ちる。屋根の雪おろしも事故を招きやすい。突然、足元の雪が滑り出したら最後、一緒に滑落するのを覚悟するしか方法がない。

今日のように住宅が接近し、軒先が通路に近づいてくると、屋根雪の滑落による歩行者の事故やその他のトラブルも発生しやすい。

屋根材には雪が自然落下しやすいカラートタンがよいと思ひ込んでいた北海道人には、同じ雪国北陸のカワラ屋根は奇異に映る。その北陸に転動した最初の雪降ろしで大失敗した。力を加えた足が突然滑りだし、止める術

もなく転落してしまった。光沢のあるカワラの表面が、一見大理石のように思えた。改めて地元の人たちの雪降ろしを観察して、カワラの上一面に薄く雪を残しているのに気づいた。丈夫な雪の板を作って足場を固めるのがカワラ屋根の雪降ろしのコツになっている。

舗装路面では自動車がスリップして危険な状態になることは稀である。ところが、氷雪路面ではタイヤの滑り摩擦が小さいために、車は容易に止まらない。ブレーキのかかった車はどの方向へ進むか見当がつかず、車体が反転することも珍しくない。徐行中やブレーキをゆっくり踏んでもスリップしてしまうのが氷雪路面の特徴と言える。冬道の路面状態は雪、氷、舗装の各部分が不均一に分布するうえ、わだちもある。摩擦の大きさはタイヤ毎、場所毎に異なることになり、ハンドルがきかず、車はドライバーの意思に反し、摩擦の大小に依存して進路を変えることになる。

欧米ではフリージングレインという過冷却の雨の降ることがある。いたるところがアイスリンクと化し、車は曲がることも、板を登ることも困難になる。

以上、氷雪の滑りの関与する様々の現象は、氷雪の滑りが解け水の介在と密接に関係しているという信念をいだかせる。

しかし、次の体験も深く記憶に残る。昔、馬で引くソリの底には鉄のランナーがついていた。馬ソリの通ったあとはピカピカの硬い氷の表面に変わり、どんな靴もツルツルンとよく滑ったものである。除雪用のグレーダに削りとられた路面もピカピカの硬い氷の面と化し極めてよく滑った。雪が積もった直後でも、新雪と平滑面との結合が弱いので、靴の底に押し付けられた新雪と氷の平滑面との間で極めてよく滑った。これらの場合、水が関与することよりも、平滑であることに滑りを良くする原因があると思われた。水の存在を雪・氷の滑りに直結させる前に、平滑面の滑りを十分考慮すべきであろう。

以上のように、雪や氷が滑りすぎるのは困った点が多い。唯一、雪や氷の表面の摩擦の小さいことが役立つものにスキー・スケート等のウィンタースポーツがある。スキー・スケートは冬のスポーツの花である。氷とスケートとの間の摩擦係数はわずか 0.005、地球上に存在する物質の中で最も摩擦の小さいものとして注目される。

表面の関与する問題の中でも、雪や氷ほどその滑りが日常生活に深く係わり、多様に取り扱われる物質も少ないであろう。なぜ氷雪面が良く滑るのかについては、以下に述べるように、今日なお未解決の問題である。

2. 氷の表面

氷は H_2O の分子が水素結合だけで結合してできた物

質である。電気双極子をもつ水はあらゆる物質を溶かし込むが、水が凍って氷に変わるときには逆にあらゆる不純物を排除して純粋の氷になる。水の大きな特徴は凍るとき体積を増すということで、この類稀なる性質が地球を温暖な環境に保つのに大いに役立っている。体積膨張という性質のため、氷に圧力を加えると融点が下がり 0°C 以下の低い温度で解けるようになる。氷に加わる圧力が 130 気圧増す毎に融点が 1°C ずつ下がり、最大で -21°C に達する。圧力融解に限界温度が存在すると言うことは氷の摩擦機構の議論の上で大事なことである¹⁾。

氷は六方晶系の結晶であり、結晶粒毎に表面の性質が異なる。氷の結晶学的な滑り面は (0001) 面であり、 (0001) 面は垂直力に対しては強いが、剪断力に対して最も弱い面である。氷の硬さは温度と荷重が加わる時間によって変わるが、 -10°C で 1 秒間荷重を加えたときの硬さは 10 kgf/mm^2 と大変硬い²⁾。

融点に近い温度になると氷の表面は純粋の固体の表面ではなく、擬似液体膜に覆われたものになる。その厚さは $1\sim 10\text{ nm}$ 程度で、温度と結晶面によって異なり、 -20°C 以下では消滅する³⁾。

3. 氷の摩擦機構

1887年イギリスの Joly は水が凍ると体積 (比容) が増すことに注目して、氷の摩擦機構として、圧力融解説を出した⁴⁾。スケートの刃が加える高い圧力で氷の融点下がり、解けてできた水が潤滑作用をすることを考えた。

融解を起こさせるためには熱の供給が必要である。滑走速度が早くなって熱の供給が不十分となれば、解け水は形成されず滑りは悪くなるであろう。

1939年 Bowden と Hughes は回転する氷円板と鉄やエボナイトなど熱伝導率の異なる模型ソリ間の滑りを調べて、①高速の方が摩擦が小さいこと、②熱伝導の悪いソリの方が良く滑るという結果を得た。その結論として、摩擦熱によって解けた水が潤滑作用をするとする摩擦融解説を提唱した⁵⁾。

その後、圧力融解説に対する批判として、スキーやスケートと氷雪面の間に発生する圧力が通常の滑走では融解に不十分であること、圧力融解には -21°C という限界温度があって、広い温度範囲の滑りを説明できないことが指摘された。

1950年代にはいろいろの摩擦説が出された。カナダの Niven は氷表面の水分子がボールベアリングと同様の作用をするとする説を出し⁶⁾、アメリカの Mc. Conica はマグネシウム滑走面のスキーが良く滑ることから、スキーと雪面の間に水蒸気の膜が出来るとする水蒸気潤滑説を出した⁷⁾。これは高温の鉄板の上に落ちた水滴が

下面から激しく蒸気を噴射し、浮上するのに似ている。Weyl は氷表面の熱力学的理論の帰結として、表面には固体の水が露出しているのではなく、固体と液体の中間物質である擬似液体膜に覆われているとした。この理論の応用として、スキー・スケートの滑りに擬似液体膜による潤滑が関与するという考えを提唱している⁸⁾。わが国では、中谷が雪粒子がスキーと雪面の間でボールベアリングの作用をするとした⁹⁾。藤岡は雪面上に長く放置された板やスキーが雪面に堅く凍りつくことの経験に基づいて低温癒着説を提案した¹⁰⁾。

このように 1950 年以降、解け水に依存しない説が多く出されたが、広範囲な条件下においてスキー・スケートがなぜよく滑るのかには不明な点が多い。

一般の固体物質間の滑りの場合には、摩擦は凝着説によって説明されている。つまり、固体の表面というものは分子のオーダーから見ると極めて大きな凹凸を持つので、接触は主に二つの表面の突起間で起こり、大半は隙間になっている。突起部に荷重が集中する結果、金属の場合には塑性変形が起こり、拡大した真の接触面が形成される。摩擦とは主としてこの真の接触面を剪断の力で行きちぎることであるというものである。

凝着説は固体間の摩擦機構の古典論とされながら、氷の滑りには長い間適用されなかった。その理由としては氷雪上の摩擦が通常の固体物質間の摩擦 (摩擦係数約 0.5) に比べ桁違いに小さく、むしろ流体潤滑の値に近かったことが挙げられるであろう。

対馬の単結晶氷の上に滑らせた鋼鉄球の滑りは、低速、低温においても、摩擦係数が $0.005\sim 0.1$ の範囲にあり依然として小さかった¹¹⁾。さらに、結晶面の違いによって、同一結晶面上では滑り方位の違いによって、摩擦が異なった。それらの結果は定量的にも凝着説で説明された¹²⁾。融解の生じない条件でも摩擦が小さかったことから、Bowden らの学説の根拠が崩れ、速い速度領域での滑りが解け水による潤滑によるのかどうか疑問が持たれるようになった。

氷の融解を伴わないような低速度領域の摩擦には凝着説が当てはまる。また、突起間のかみ合いによる掘り起こし抵抗も無視できないことが示された。その後、スキーやスケートを用いた室内実験が行われ、遅い速度領域においても摩擦は小さく、凝着説の当てはまることが確認された。しかし、実際の競技速度のような高速度領域の滑りにおいて、凝着説がどの程度当てはまるかについては現在のところ未解決の問題として残されている。

4. 氷雪の摩擦の関与する問題

4.1 タイヤの脱スパイクは可能か？

路面に積もった雪は走行するタイヤによって繰り返し圧縮され、気象の影響も加わって、硬い雪や氷化した路面に変わる。もはやタイヤは雪面にくい込むことが出来なくなり摩擦が低下する。そのため超高硬度合金のタングステンカーバイトのびょうを打ち込まれたタイヤによって、路面へのくい込み抵抗を作りだして摩擦を大きくしている。このスパイクタイヤは氷化した硬い路面には抜群の効果をもつのだが、困ったことに雪のない舗装路面をも削り取り粉塵公害をもたらした。公害防止のため脱スパイクが決定されたものの、それに代わる滑り摩擦の大きいスタッドレスタイヤ（スパイクのないタイヤ）は目下のところ研究開発中というのが現状であろう。氷雪路面ではブレーキや急ハンドルを最小限にするとともに、当分タイヤチェーンが必携になりそうである。

4.2 スキー・ワックスの効果

スキーの滑走面には疎水性のポリエチレンが用いられる。雪面の状態は新雪から硬いアイスバーンまで様々に変化するので、最適滑り条件をえるのにワックスを用いる。雪質や温度に合わせたワックスが選ばれる。ところで、ワックスの効果としては、摩擦によって発生した水をはじくことで滑りを良くすると言われてきた。しかし、筆者等の実験ではワックスとガラスやプラスチック材の間に挟まれた狭い隙間の水滴は吸引力を発生し、これまでの定説に疑問がもたれた¹³⁾。

立場を変えて、凝着説でワックスの効果を解釈してみよう。ワックスが氷との付着を小さくすることで摩擦を小さくし、さらにワックスがスキーの滑走面を平滑に仕上げることで凹凸による滑走面と雪面のひっかかりを小さくし摩擦を減少させる効果がある。先入観にとらわれることなく、摩擦の古典論からワックスの効果を解明することも必要であろう。

4.3 セラミックスケート

スピードスケートには幅 1.2 mm、長さ 400 mm のブレードが使われる。氷は硬さが 10 kgf/mm² もあり、通常のステンレス鋼ではエッジの摩耗が激しい。競技用には超硬ステンレス鋼が用いられる。

最近、ファインセラミックスのスケートブレードが試作された¹³⁾。セラミックスは非常に硬く、表面の荒さは 0.03 μ m という鏡面状に仕上げられていた。この表面仕上げの良いたが従来のスケートに優る滑りを与えた。試作ではエッジの幅を 0.7 mm～1.2 mm まで変えた。氷の表面状態は温度その他の条件によって変わるので、与えられた氷のリンクに対する“最適滑りのスケートの

条件は何か”という新しい問題も提起された。氷の条件に合わせて、スケートのブレードを入れ替える時代が到来するかも知れない。

4.4 リニアモーターカーのプラットホームに氷の軌道？

磁気浮上の列車もプラットホームでは着地する。札幌-千歳の場合、年間を通して気温が低く 1 年の半分近くは氷点下になる。氷は摩擦が小さく、エネルギーロスが少ない。また、たとえ破損しても容易に補修できる利点がある。そこで、プラットホームを氷の軌道とし 1 両 40 トンにもおよぶ車両を支えようという考えもある。

それとは別に、氷の摩擦の小さいことに注目して、2 本の氷の軌道にソリを、中央のコンクリートの軌道に駆動輪を走らせる新しい輸送方式もテストされた。

5. おわりに

氷の滑りの問題に長く携わってきて感じたことは、氷の摩擦機構やスキーワックスの効果に関する研究が、いかに先入観に彩られてきたかということであった。氷の滑りの問題には摩擦機構をめぐる議論のように、いまだに混沌とした部分があり、また実用面ではタイヤの脱スパイクというように解決を迫られている問題もある。

1998 年に日本に再度冬季オリンピックを誘致しようという運動が盛んに行われている。1972 年の札幌冬季オリンピックを契機に注目された氷雪の科学が表面科学の成果を取り入れて一段と発展することが期待される。

文 献

- 1) 前野紀一：氷の科学（北大図書刊行会）。
- 2) T. R. Butkovich: SIPRE Res. pap. 9 (1954).
- 3) P. V. Hobbs: "Ice Physics" (Clarendon Press, Oxford, 1974) p. 396.
- 4) J. Joly: Sci. Proc. Roy. Dublin Soc. 5, 453 (1887).
- 5) F. P. Bowden and T. P. Hughes: Proc. Roy. Soc. A, 172, 280 (1939).
- 6) C. D. Niven: Can. J. Phys. 37, 247 (1955).
- 7) T. H. Mc. Conica: Report to the Research and Development Branch, Office of the Quartermaster General, U. S. Army (1950).
- 8) W. A. Weyl: J. Colloid Sci. 6, 389 (1951).
- 9) U. Nakaya, M. Tada, Y. Sekido and T. Takanashi: J. Fac. Sci. Hokkaido Imp. Univ., ser. 2, 1, 265 (1936).
- 10) 藤岡敏夫：低温科学 A, 17, 31 (1958).
- 11) 対馬勝年：潤滑 22, 518 (1977).
- 12) 対馬勝年：低温科学, A, 35, 1 (1977).
- 13) 対馬勝年・国際スキー製造技術研究会 21 大会サマリー 76 (1988).