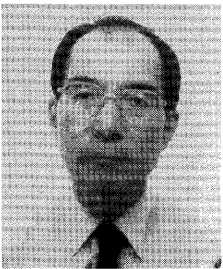


解説

雪・氷との摩擦

Friction on Snow and Ice

執筆者プロフィール



対馬 勝年
Katsutoshi TSUSHIMA

◎1943年1月生まれ
1969年北海道大学大学院修士課程修了, 1969年低温科学研究所助手,
富山大学助教授を経て1988年より教授
◎研究・専門テーマは雪氷のトラボロジー, 熱サイホン発電
◎富山大学教授 理学部
(〒930-8555 富山市五福3190/
E-mail: tusima@sci.toyama-u.ac.jp)

1. はじめに

木板や舗装道路ではスキー、スケートは滑れない。雪や氷の上だからスキー、スケートはよく滑る。光沢のあるステンレス板や磨かれた大理石上の雪や氷もよく滑り、歩行にとって危険でさえある。札幌市内ではスパイクタイヤの禁止により、道路上の雪が綺麗になった。困ったことに、横断歩道上の雪面が滑りすぎて歩行に困難が生じた。雪や氷の滑りは、このほかに、タイヤのスリップ、屋根雪の滑落、除雪道具（スコップ、ダンプなど）、傘、流雪溝、砕氷船と海水の摩擦、各種道路標識や気球などへの雪の付着など関連する問題が多い。

ウィンタースポーツの中でもスピードスケート、スキーの滑降、距離競技は氷や雪との摩擦が深く関与している。

スケートリンクの製氷マンはより滑る氷作りにしのぎを削り、スキーのワックスマンは雪質に適合するスキー滑走面の仕上げにしのぎを削る。しかし、雪上や氷上のスキーやスケートがなぜよく滑るのかという平凡な問いでさえ、

明快な答が得られているわけではない。

2. スキーやスケートはなぜ滑るか

2.1 スケートの滑り

スピードスケートと氷の摩擦係数は0.004程度であり、地球上に存在する固体物質間の摩擦で最も小さな値である。選手は15m/s程度の高速で滑る。スケート競技では500mより1000mの平均速度のほうが速い。

スケートはなぜかくも良く滑るのであろうか。1887年Joly⁽¹⁾はスケートの刃が加える圧力で氷に融点降下が起こり、氷が融解し、融け水が潤滑作用をするという学説を出した。いわゆる、圧力融解説である。1930年代まで圧力融解説全盛時代であった。

1939年Bowdenら⁽²⁾は融け水による潤滑がスケートの滑りをよくしていることは認めたが、スケートの圧力による融点降下では -1°C 以下の氷を融かせないとした。融け水は摩擦熱による融解で発生すると主張した。これが、摩擦融解説であり、以後、最も確からしい学説として多くの研究者に受け入れられた。

しかし、以下の異論も出された。高温では氷表面が疑似液体膜に覆われることに注目した疑似液体膜潤滑説、氷の分子が球形に近いことに着目し、水分子がころの役割を果たすと考えた水分子回転子説である。

筆者は単結晶氷上の鋼球やスケートの滑りから、氷の結晶面により摩擦が最大二倍も異なる結果を得た(図1)。この氷の摩擦の異方性、ならびに、氷は硬さ(-10°C で100MPa)に比べ、せん断強さが著しく小さい(-10°C で1MPa)ことに着目し、水の関与しない凝着説(摩擦は接触する二面間の真の接触部の凝着と突起が食い込んで傷を付ける掘起し抵抗による)を適用した⁽³⁾。

2.2 スキーの滑り

雪面を滑るスキーの摩擦係数は0.05程度である。スキーはワックスを塗ったとき最高の滑りが得られる。ワックス

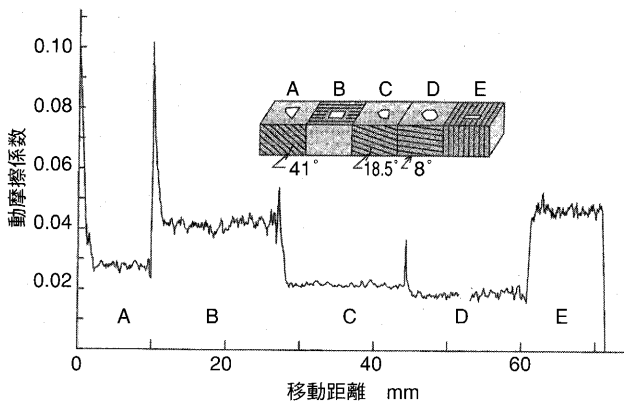


図1 氷の結晶面による摩擦の違い（鋼球—氷平板の摩擦，温度： -19°C ，速度： 0.07mm/s ，荷重： 10N ）。氷の底面（0001）を斜線で示した。

が摩擦を小さくする効果としてよく言われるのは、ワックスの撥水性である。プロスキーヤーはワックス仕上げ面に細かい溝（ストラクチャ）をつける。その理由は融け水をスキーの滑走面外に排出するのだと説明され、大方の賛同を得ている。

スキーの底に電極を張り、滑走中の誘電率の変化から融け水の厚さを推測した研究もある⁽⁴⁾。

筆者もかつて回転する雪円板の上にドーナツ状のスキーソールを滑らせ、高速(10m/s)の摩擦の際に遠心力で飛び出す融け水を検出したことがある。

スキーの滑りと融け水による潤滑は結びつけやすい。しかし、藤岡⁽⁵⁾は各種の板上に雪ブロックを滑らせ、摩擦の大きい材料に対しては表面の雪粒から小さなつららが発生したが、摩擦の小さい摩擦材ではつららを認めなかった。また、スキーを雪面に接触させ、一晩放置しておく、強く凍り付くことに着目し、低温癒着説を唱えた。

McConica⁽⁶⁾は各種材質のスキーを雪面上に滑らせ、マグネシウムスキーがよく滑ることを見出し、水蒸気潤滑説を提唱した。

垂直な切れ目に着色剤を混入した雪面上のスキー滑走では、表面層の流動が見い出されたことから、雪粒がころの役割を果たすという考えも出された。

このようにスキーの滑りに対してもさまざまな学説が出されたが、融け水による潤滑が最も有力とされてきた。

2.3 摩擦融解説への疑問

摩擦融解説は、摩擦係数が高速の0.05と低速の0.4との違いの説明として導入された。もし、Bowdenらが今日計測されているように、低速に対しても小さな摩擦係数を得たなら、摩擦融解説は提唱されなかったであろう。

スピードスケートと氷の摩擦係数は0.004程度に小さいことを述べた。このような小さな摩擦が計測されたのは札幌オリンピック（1972年）以降であり、当時は0.05でも驚異的に小さな摩擦係数であった。

氷が融けて水が発生するには熱が必要である。摩擦融解説では摩擦仕事の一部が熱として供給される。当然、摩擦係数がある程度以上に大きいとき融解が起こる。摩擦が極端に小さくなったらどうなるか。発生する熱が小さくなり、もはや、氷を融かせない状態が出現するであろう。その時、滑りはどうなるかという、摩擦融解説では水がないから、摩擦が極端に大きくなると結論する。これは明らかな矛盾である。つまり、摩擦融解説に内部矛盾がある。

氷筥^{ひょうじゅん}リンクで結晶面によってスケートの摩擦が異なったのは、融け水が存在せず、固体の氷の結晶面上をスケートが滑っているから、硬さ、せん断強さ、塑性などの氷結晶面の特性が滑りに反映されたと解釈される。

同じ疑問はスキーの滑りにも言及できる。ワックスを塗った滑走面と雪面との摩擦がある程度大きいとき、雪粒先端に融解が起こる。摩擦が小さければ、固体の氷の上をワックス面が滑っていくことになる。

融け水に対するワックスの効果についても疑問がある。ワックスの水に対する接触角は 110° 程度であるが、狭いすきまの水に対しては、表面張力により、水自身の形状が変わり、バルクの水の接触角が当てはまらない。雪粒との間に形成される極めて薄い水膜をワックスははじくことができず、逆に吸引となるはずである。

-10°C 、数 mm/s の低速度で雪面に滑らせたスキーでも0.05程度の低摩擦が得られた。融解を伴わなくともスキーの摩擦は小さい。

以上のように、ごく身近なスキーやスケートの滑りに対しても、その摩擦機構は確定されていないと言える。

3. 高速スケートリンクへの挑戦

3.1 空気抵抗の問題

ウィンタースポーツで歴代の記録が競われるのはスピードスケートだけである。世界記録を出すリンクは高速リンクと呼ばれ、世界から一流選手が集まる。製氷マンは世界最速の高速リンク作りにしのぎを削る。

ところで、氷とスケートの間の摩擦が小さいことは記録製造の一つの条件であっても、十分条件ではない。15 m/s の速度は台風並である。氷面の摩擦抵抗は小さいから、選手が受ける抵抗のほとんどは空気抵抗となる。選手は空気抵抗を軽減するために独特の低い姿勢をとる。

空気抵抗は密度に比例するから、少しでも空気の稀薄なところ、つまり、標高の高いリンクが記録製造リンクとなる。室内リンクが出現する以前は標高1700 m 、ロシアのメデオが伝説の記録製造リンクであった。カナダのカルガリー（標高1060 m ）はメデオに比べ不利であったが、水温管理や室内環境のコントロールなど室内リンクの長所を生かすことで、高速リンクとして君臨するようになった。

日本で二度目の冬季オリンピックが1998年長野で開催された。このとき日本はなぜ、空気抵抗に無関心だったか？巨費を投じたリンクはいったい何を狙ったのか？記録が勝負のスピードスケート界の笑いのものにされているような気がする。長野県には標高1400mの野辺山にスケートリンクがあったし、我が国には氷のトライボロジー技術もあった。それらがオリンピックに活かされなかったのは残念であった。

3.2 氷の結晶面コントロールによる高速リンク

氷は図1の例のように結晶面によって摩擦係数が異なり(スケートの場合, 0.004~0.006), 柱面(10 $\bar{1}$ 0)の摩擦が大きく, 底面(0001)の摩擦が最も小さい。もし, リンクの氷を底面に統一できれば摩擦の小さい高速リンクが実現するであろう。

氷結晶のコントロールによる高速リンク実現には次の三つの問題があった。

- 1) スケートの刃で破壊される結晶の修復の問題
- 2) リンク(5600m²)に貼る単結晶氷の大量生産の問題
- 3) リンクに貼った単結晶氷を厚い氷に育成する問題

1) は頻りに製氷車を入れることで, 傷ついた結晶が修復されていたことが確認された, 2) は天然の氷筍から太さ0.2m, 高さ0.6mもの巨大単結晶が見い出され, 人工氷筍育成も実現されていた。大量生産により, 必要量を確保できると思われた。3) は, すでに透明なリンク氷を作るために+40℃の温水を散水・製氷されており, 結晶が基盤から柱状に成長していることが確認された。

2) では長さ200mの氷筍大量育成(4600本)施設を作り, ベースに種結晶(結晶主軸が鉛直)を入れて単結晶氷筍を育成した。これを厚さ7mm程度に輪切りにし, およそ60万枚をリンクに貼り付けた(図2)。

摩擦係数はカタパルトで打ち出されたスケートの初速と滑走停止距離から決定された。予備的に野辺山のリンクの半周に氷底面を貼ったものでは, 22%もの摩擦係数の低下が得られた。テストスケートをばねばかりで引くと, 氷筍



図2 スケートリンクへの巨大単結晶氷の貼付け(エムウェーブ)

氷と普通水で目盛の変化が確認できるほど顕著に摩擦は変わった。

1998年12月のワールドカップ初戦で清水選手が同年2月のオリンピック金メダルの記録を上回るリンクレコードを出した。翌日の二本目で, 清水選手はコーナーで転倒, 世界記録達成は夢とついでた。しかし, ここで新たな課題をいただいた。

この年の国体は氷筍リンクで行われ26種目中21種目に大会新記録が樹立された。

3.4 次世代高速リンク

さて, 空気抵抗の減少やスラップスケートの導入, 氷結晶のコントロールなどにより滑走速度の高速化が進んだ結果, リンクのコーナー部に新たな問題が発生した。コーナーでの遠心力は速度の自乗で増えていく。遠心力を支えるのはスケートと氷の間のわずかな接触面である。高速では体重に匹敵する遠心力が加わることとなり, うまく支えられない場合, 転倒を生じる。この危険との背中合わせで滑るので, 選手は減速してコーナーを回り込むか, 高速を維持しコースを大きくとって遠心力を減少させる方法が選ばれるようになった。選手にとって, 氷は信頼されていないのである。コーナー部で遠心力を効果的に支え, 選手の潜在力を引き出す氷の探求がはじまった。

スケートの刃は氷にめり込みながら滑る。スケートの底にあった氷はどこへ行くのだろうか。融けて周囲に広がるのだろうか。それとも, 水あめのように周囲に塑性的に押し出されるのだろうか。石こうによる滑走痕の型どりから, 氷が塑性的に盛り上がっていることが判明した。氷の塑性変形の異方性を活用し, コーナーの外側に氷が押し出されるように結晶を配置すれば, 自己バンク形成氷が実現される。バンクが遠心力の支持に加わり, 選手により早い速度で回り込むことを可能にするであろう。

(原稿受付 2004年11月4日)

●文献

- (1) Joly, J., The Phenomena of Skating and Professor J. Thomson's Thermodynamic Relation. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, 5 (1887), 453-454.
- (2) Bowden, F.P. and Hughes, T.P., The Mechanism of Sliding on Ice and Snow. *Proc. Roy. Soc.*, A, 172 (1939), 280-298.
- (3) 対馬勝年, 単結晶氷の摩擦に関する研究 I~III. *低温科学*, A, 35 (1977), 1-46.
- (4) Ambach, W. and Mayr, B., Ski Gliding and Water Film. *Cold Region Sci. and Technol.*, 5 (1981), 59-65.
- (5) 藤岡敏夫, 雪橇の抵抗 VI-積雪と板との摩擦 4, *低温科学*, A, 21 (1963), 31-44.
- (6) McConica, T.H., Sliding on Ice and Snow. Report to the Research and Development Branch, *American Ski Company*, (1950), 1-46.