

【教育講演Ⅱ】

滑 走 の 科 学

對 馬 勝 年

(富山大学理学部)

1. はじめに

ウインタースポーツは滑りとの関係が深い。スキー、スケート、そり、カーリングのいずれも雪上や氷上の滑りである。スキーの滑降、回転、ジャンプでは位置エネルギーを利用して滑る。滑降、回転、ジャンプのアプローチなどでは純粹の滑走面の摩擦抵抗以外に「空気抵抗」に多くのエネルギーが費やされる。またスキーのエッジで雪面を削ればエネルギーのロスになる。ボブスレー、リュージュなどのソリ競技も位置エネルギーを駆動力に滑っていく。この場合、摩擦や空気抵抗の他に、ランナーが氷に傷をつける際にエネルギーのロスがある。一方、スケート競技では平面上を滑るので位置エネルギーの利用は出来ない。脚力で駆動力を作り出し滑走する。そして、空気抵抗や摩擦抵抗を小さくすることが速く滑ることにつながる。

スケートと氷の間の動摩擦係数は0.005内外で、極めて小さい。おそらく、地球上に存在する固体物質の中で最も小さい摩擦(動摩擦係数)であろう。

スケート滑走の科学で、最大の争点は「スケートが良く滑るメカニズムは何か?」であり、19世紀末以来1世紀を経てなお究極の結論には達していない。

スケートの滑走はウインター・スポーツのもつ特徴を抜きにしては議論できない。つまり、「順位を競う」競技と「記録を競う」競技があるということである。たとえば、ジャンプ競技で原田選手がK点を遥かに超える大ジャンプをしても、飛距離に意味がない。世界中に比較できるジャンプ台が無く、助走地点も一定でないからである。自然の地形を利用するスキー競技も同様である。ウインタースポーツのほとんどは順位だけが競われ

る。

しかし、リンクに国際規格を持つスピード・スケート競技はタイムが競われ、絶対的な記録への挑戦である。それは駆け引きなしに自己の極限への挑戦である。昔は、空気抵抗の小さいロシアのメデオ(標高1700m)で世界記録の多くがうち立てられ、高速リンクといわれた。1988年カルガリー・オリンピックの室内スピードスケートリンク(標高1060m)は世界記録を塗り替えて、製氷や滑走環境のコントロールが標高の壁を克服することで室内リンクの優位性を示した。次いで現れた衝撃は、道具であるスラップスケートが世界記録をことごとく塗り替えたことである。第3の探求として氷のコントロールによる記録更新が目指される。

2. スケートの滑り機構

2.1 氷の摩擦

スケートの摩擦機構に関する最初の学説として圧力融解説が有名である。この学説はJoly(1887)によって提唱されたとするのが正しい。圧力説について一部に誤解があるので、付け加えると「圧力では氷は融けず、融解には熱の供給が必要」なことである。

Bowdenら(1939)はスケートの滑りが解け水による潤滑に間違いのないとしても、その水は摩擦熱で作られると主張した。摩擦融解説は次の実験結果に基づいて提案された。

- ① 低速(30 mm/s)では摩擦係数が0.3と大きく、高速(4 m/s)では0.04と小さい。
- ② 熱伝導率の小さい材料ほど摩擦係数が小さい。
- ③ 荷重が大きいほど摩擦係数が小さい。
- ④ 低温になるほど摩擦係数が大きい。

- ⑤ 水に対する接触角の大きい表面ほど摩擦が小さい。

その後、近年に至るまで実験および理論の両面から摩擦融解説を支持する数多くの論文が発表されている。スケートの滑走面の温度の測定、スキー滑走面に形成される水膜の厚さの測定も行われ、摩擦融解説の強固な牙城が築かれてきた。

しかし、上記二つの学説以外に提案がなかったわけではない。McConica はマグネシウム滑走面が良い滑りを与えたことから水蒸気潤滑説を提唱し、Niven はヒータを組み込んだソリで加熱の効果が得られないこと、氷分子(水分子)が球形に近い形状であることに注目して、分子回転説を唱えた。Weyl は表面構造の研究から氷表面層は疑似液体に覆われていることを導き、疑似液体膜潤滑説を唱えた。対馬は氷は「硬い」が「せん断に弱い」という特徴に注目し、単結晶氷の板と鋼球の摩擦実験に基づいて、古典的な凝着説で氷の低摩擦を説明できるとした。

2. 2 実際のスケートを使った摩擦の測定

1972年札幌冬季オリンピックでは北大低温科学研究所が中心となってスケートリンクの氷についてテストスケートによる動摩擦係数の測定が行われた。小林禎作らはスケート研ぎ台に競技用スケートの刃を固定した滑走装置を試作し、カタパルト式に滑走装置を発射し、滑走距離から0.002から0.012という小さな摩擦係数を得た。

2. 3 スピードスケートの競技記録に影響を与える要素

- (1) 氷温：氷は温度に依存する粘性と弾性を持つ物質である。短距離は高め、長距離は低めの氷温に調整される。
- (2) 湿度：氷表面への結霜抑制のため、低い湿度が必要である。
- (3) 氷面の仕上げ状況：平滑な表面、特にコーナーでの平滑度が肝要
- (4) 室内気温：選手にとって寒すぎず、力を出せる気温が必要。
- (5) 製氷：エムウェーブには優れた製氷技術が

ある。まず、0.5 mm 程度の厚さにお湯が撒かれる。氷の上に薄く広げるように撒くことでベースの氷がわずかに解け、一体となった氷の結晶が柱状に真上に伸びる。一回毎に薄い氷がゆっくり凍るので、水中の気体成分が表面から押し出され、透明な氷で成長する。競技中はザンボニーで傷ついた氷が削り取られ、その後にお湯を撒いて結晶が再生される。氷の厚さは 30 mm 程度。

- (6) スケートの刃：シャープな刃で氷面にしっかりと食い込み、氷からの反作用を有効に受け取れるようにすることが必要である。
- (7) 空気抵抗と酸素濃度：空気抵抗は空気密度 ρ と速度 V の 2 乗の積 ρV^2 に比例する。秒速 15 m, 100 m をわずか 7 秒弱で滑るスピードスケートは、台風に向かって進むようなものであり、空気抵抗は滑走面の摩擦抵抗の 10 倍にも達する。このことが高地のリンクで良い記録の出る理由となっている。一方、長距離滑走では平地における空気抵抗の不利を酸素濃度の有利さで一部をうち消していると考えられる。

2. 4 氷の結晶が滑走に影響を与える

氷の結晶はランプのカードを積み重ねたようなものと言われる。カード同士が滑って氷の変形が生ずる。カードが柱状に積み重なっているとき、真上から受ける荷重に対しては強く、横方向の力つまりせん断力に弱い。そのため摩擦が小さくなる。カードが鉛直に立って横方向に重なっている場合、せん断力が大きいので摩擦も底面の 2 倍程度に大きくなる。しかも、この場合、滑る方向によって摩擦が異なる。カードが傾斜して積み重なっている場合の特徴は、順方向と逆な方向で摩擦が著しく異なることである。

氷結晶の基底面は摩擦が小さく、柱面は摩擦が大きい。氷の結晶面によって摩擦が 2 倍も異なる。氷結晶面のコントロールは摩擦の小さいリンクも摩擦の大きいリンクも作る。単結晶は結晶境界が少ないから摩擦が小さくなると考えるのは間違いで、結晶面上の摩擦そのものを小さく調整してい

る。

2. 5 コーナでの問題

コーナで選手は速度 V の2乗と曲率半径 R の逆数の積(V^2/R)に比例する強大な遠心力を受ける。選手は遠心力による転倒の恐怖と背中合わせで、滑走する。スケートの刃は幅がわずか1mm、長さ方向に湾曲もあり、氷との接触面は小さい。その小さな接触面が遠心力を支えるのであるから、遠心力に耐える刃の食い込みの実現が課題となる。刃は滑っている間に摩耗し、食い込みが悪くなるであろう。そのため、選手は自分の刃を研磨し、シャープなエッジを維持しなければならない。

コーナでは滑走方向の摩擦は小さく、滑走に直角方向の摩擦は無限大となっている。

2. 6 氷の結晶が滑走を助ける

スケートの滑走では直線部分で低摩擦、コーナ部で遠心力に耐える氷(バンクを作る氷)が探求されるべきであろう。氷の結晶はランプのカードを積み重ねた形をしており、カードがずれることで変形が起こる。コーナでは刃が食い込み、遠心力が有効に支えられる氷が要請される。もし、その条件を満たしていないとき、選手はコース取りの工夫によって遠心力の効果を小さくしたり、速度を抑制して臨むことになり、選手は力を出し切れないであろう。コーナ部の氷温を高め設定し、氷を柔らかくして、食い込みを助けようという方法もあるであろう。氷の結晶コントロールの見地からは、コーナではスケート刃の外側に氷が押し出され、その氷がバンクとなって遠心力の支持に貢献するような氷が探求される。

2. 7 空気抵抗の問題

空気抵抗 D は空気の密度 ρ と速度 V 、みかけの投影面積 A が関係する。

$$D = (1/2) \rho A V^2$$

1気圧では

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

標高が空気の密度を変え、空気抵抗を変える。標高の高いほど空気抵抗は小さい。選手の受け

る空気抵抗の測定は、1972年の札幌冬季オリンピックに関連して、風洞を用いて測定された。秒速15mで空気抵抗の小さい卵形姿勢の抵抗は70N(=7kgf)であった。体重600N(=60kgf)の人の摩擦抵抗はわずか2.4Nである。空気抵抗の30分の1に過ぎないことが分かる。

空気抵抗は空気の密度に比例した。カルガリーと長野では空気の密度が7%異なる。したがって、空気抵抗の違いは4.9N、摩擦抵抗の2倍も大きい。エムウェーブでいくら摩擦抵抗を小さくしてもカルガリーの室内リンクにかなわない。

2. 8 滑走痕を見る

スケートで滑った跡のリンク氷面には明瞭なシュプールが刻まれる。そこに石膏やシリコンを流し込んで、シュプールの鑄型が作られた。そして、スケートの刃によって氷が水飴のように周りに押し出していることが示された。秒速10mを超える高速の滑りでも氷は塑性的に変形し押し出されていたのである。

2. 9 スケートの滑り機構のパラドックス

スケートの滑りは1939年Bowdenらにより提案された摩擦融解説で説明されてきた。その後、学説が多くの研究者により支持され、強固な牙城を築いてきたことを述べた。摩擦融解説では水がなければ、摩擦係数は普通の物質と同じような0.3程度の大きな値を示す。摩擦面に潤滑の役目を果たす水が発生するとき摩擦は0.04内外の小さな値に低下する。解け水の発生がスケートが良く滑る原因であると主張する。

氷を解かすために必要な熱は摩擦抵抗から生ずるとするのが摩擦融解説である。ところで、「摩擦が大きいほど、発生する摩擦熱が大きく、多くの解け水が発生し、滑りが良くなる(摩擦が小さくなる)」と考えると、自己矛盾に気づかれるであろう。解け水を作るにはある程度以上の大きな摩擦が必要である。もし、氷を解かせないほど摩擦が小さくなったらどうなるか?摩擦融解説では「摩擦が大きい」と結論づける。「摩擦を小さくしたら摩擦が大きくなるというのは矛盾」であ

る。

スケートの0.004という摩擦係数は発生する摩擦熱が極めて小さいことを意味するものであり、解け水を作れないほど摩擦が小さいことに該当するのであろう。そうすると、スケートの滑りでは融解はない。だから、氷の結晶面をコントロールすることによってさらに良く滑る氷のリンクを実現できたと解釈するのが正しい。

それでは、摩擦融解説を支持した牙城はどうなるのか？摩擦融解説は摩擦の大きい0.01オーダーの摩擦係数の説明のために発展したと言える。

2. 10 究極の水

スケートリンクで探求される氷は如何に選手の潜在力を引き出すかにかかっている。たとえば、ノーマルスケートと記録を更新したスラップスケートを比較してみよう。道具であるスケートが選手の潜在力を引き出したから、世界記録が次々と塗り変えられていったと解釈される。氷の場合も同じで、最適温度への調整、高純度、平滑度、透明度などの維持などが目指され、選手の潜在力を引き出す探求が行われてきた。リンク製氷マンは記録の出る氷作りを目指して鏝を削ってきたと言える。

直線部では摩擦最小となる氷の基底面を貼ることによって高速化を実現できた。次の課題はコーナで選手の潜在力を引き出す氷である。コーナで速度の2乗に比例して現れる遠心力の恐怖から選手を解放し、高速化を可能にするバンクを形成する氷が探求される。そのような氷が滑走痕の鋳型の解析から導かれた。選手のスケートでバンクを形成しながら滑る「氷の結晶面と結晶方位」を提案でき、選手の潜在力を引き出す究極の氷を描くことができる。

3. おわりに

国際規格があり平等でフェアであると思われたスピードスケート競技に、標高に由来する壁を見た。この不条理とも思える空気抵抗のハンデいを克服する道はあるのだろうか？

わが国はオリンピックにおいても技術立国を目指し、世界トップの室内スピードスケートリンクを狙って、空気抵抗の対策を講ずるべきであった。札幌オリンピックから26年、二度目の冬季オリンピックで国の威信をかけた壮大なリンクを建設しながら、なぜスポーツ界における世界のセンターを逃したのか？それが私の抱く疑問である。

札幌オリンピックでスピードスケート競技の本質を見抜けなかったと断言せざるを得ない。その後26年間、空気抵抗の問題は議論されることが少なかった。それはとりもなおさず、その分野に於ける日本の知性のレベルを露呈する結果となった。

氷結晶のコントロールには多額の費用がかかるのが欠点である。しかし、床に敷いた代用水のシートに散水するだけで希望の結晶面が得られるなら、それはスピードスケートだけでなく、ボブスレーやリュージュのような曲面コースにも応用できる技術に発展する。コーナにもバンクのできやすい結晶面が工夫され、最短距離を最高速度で滑走する究極の氷が理想である。私はそのことを含めて選手の潜在力を引き出す氷の探求と呼んでいる。

将来の気圧コントロール室内リンクでは水温の他に気圧が記されるようになるであろう。次回オリンピックのソルトレークは標高が高く自然条件に恵まれているが、平地でどのようなスピードスケートリンクを実現するかはその国の知性を測る尺度となる。