

スキーが良く滑るのはなぜ？

＜初めに＞

スキーが楽しいのは、スピードが出てスリルがある、美しい自然の中で行うスポーツである、などあげるスキーヤーが多い。ここでは、スキーが良く滑ると言う当たり前のことを科学的に考察し、スピードが出ること、すなわち雪とスキーの摩擦力が小さいこと、さらにその摩擦力が雪の温度や雪質により異なることについて、スキー研究の歴史を辿りながら検討する。

＜雪の摩擦の研究＞

雪の上を滑るスキーの特性を語るには、雪の性質を理解することがその第一歩となる。ところで、氷が水に浮かぶ事や水道管が凍結破裂することは常識であろう。それを科学の言葉で表現すれば、固体である氷の方が液体状態より体積が大きい（密度が小さい）からである。そして氷に圧力を加えると氷点下でもその温度の水に変体する事を意味する。この様な性質をもつ物質は、ありふれた水以外では大変珍しい。スキーの圧力で雪が解けその水が潤滑剤の働きをすると言う理屈でスキーが特別に良く滑る事を示したのが、1887年に発表された J. Joly の圧力融解説である。（1）これが科学を基礎にスキーの滑走性を説明した最初の理論で、流体力学の第一人者のレイノルズが支持した事もあり広く認められてきた。この説は実験的に検証された訳でもなかったのに、10 年位前まで大学の物理化学の教科書にも引用され、スケート滑走の説明がなされていた事は驚くべきことである。

1939 年バウデンらは、圧力による融点上昇は非常に小さく潤滑作用を示すほどの水量は発生しない事を数値計算で示している。そして氷の特異な摩擦現象を理解するため、安定した低温と清浄な空気を求め、スイスのユングフラウヨッホ（氷のスフィンクス）で氷と様々な物質との摩擦力を温度や滑走速度を変えて測定し、新たに摩擦熱により水ができると考えた摩擦融解説を提案した。（2） その後も、摩擦界面に水のできる原理について詳しい研究が多数行われてきた。

一方、富山大の対馬は、1977 年雪や氷の特異な物性に基く新たな説を報告している。（3）すなわち、氷の結晶は押したり引いたりする力に対しては強いが横にずらす力（せん断力）に対しては極端に弱いと言う性質を見出した。これは、氷同士をくっ付ける力（凝着力あるいは接着力と言う）の特性で、わざわざ潤滑剤として水の発生を考えなくても氷の摩擦力が大変小さいことを説明できる。氷同士の凝着力の特性（凝着は実際に接触する接点で起こり、見かけの接触面積の 1/10 ～1/100 の面積）に摩擦力が小さい原因が有るという考え方を、

凝着説と言う。

＜スキーの摩擦をどう理解すればよいか？＞

世界のスキー界で、雪の摩擦現象の理解が進んでいない。スキーの滑走で摩擦熱により水ができることは実験的に証明されているわけではないにも拘らず、スキーやスケートに関する書物には摩擦融解説が広く引用されている。雪氷に関する研究者にもスキー、スケートやカーリングの摩擦に関してこの摩擦融解説を支持する人が多く、ことにスキー先進国の欧米では事実のように扱われている場合が多い。ただし、スキーとスケートでは雪との接点（真実接点）における荷重が大きく異なるので、摩擦の原理が異なる可能性がある事も摩擦原理の理解を複雑にしている。

ここで少し違う側面から摩擦現象を詳しく検討する。摩擦融解説に従えば、速度や荷重が増加すると摩擦による発熱量が増え、したがって水の発生量が増加し摩擦力が減少する、しかしその時は摩擦力が小さいので発熱量も小さくなり、その結果摩擦力は増加することになり、この説は自己矛盾となる。このことは、すでに対馬が指摘している。さらに、対馬はスケートの摩擦力が氷の結晶面により異なる事を実験的に明らかにした。この事実は、摩擦融解説が正しいならば、同じ一つの氷の結晶で融ける温度が面により違うと言う妙なことになる事を示している。

ところで、スキーやスケートは低温から氷の融点に近くなるにつれて良く滑るようになり、 -3°C 辺りが最良となる事が広く知られている。これは摩擦融解説でも凝着説でも一見説明可能と思われる。しかし、どのような速度でも、また荷重（スキーヤーの体重）が変わっても -3°C 辺りが最も良く滑る事を摩擦融解で説明するのは無理がある。最も良く滑る温度が速度や荷重に無関係であることは摩擦熱とは無関係で、雪そのものの性質と考えたほうが自然である。

実際のスキー滑走では、雪をかきわけける除雪抵抗、雪を押し固める圧雪抵抗、さらには高速度で一番問題となる空気抵抗が働き問題はさらに複雑となる。スキーやスケートのターンでは除雪抵抗や圧雪抵抗が主役となる。 -10°C 以下の低温では、特に低速度の場合スキーの滑走性が落ちる事は誰もが経験していることと思われるが、これはこの辺りの温度で雪が急激に硬くなるため除雪抵抗が増加すると考えれば矛盾はない。摩擦融解説でも低温で水が発生しにくいと考えれば説明可能であろう。温度が上昇し 0°C 近くになると急に滑らなくなるのは、多量の水による粘性抵抗が増加する事や雪が柔らかくなりスキーとの接点の数が増えるのが原因であろう。この場合は雪とスキーの見かけの接触面積を減らした方がよく滑る。つまり、エッジを立て荷重変化を少なくしたカービング・ターンがよい。

次は雪質による滑走性の違いである。空から降ってくる雪に同じ形の結晶は

無いというほど雪結晶は多様である。しかし、気象条件により大よその傾向が有る事は誰もが経験している。北大の中谷らは常時低温室を作って人工雪の研究を行い、結晶成長と温度および湿度との関係を調べることにより、降ってくる雪から上空の気象条件を推測しようとした。雪は空からの手紙と言う中谷の名言は、その手紙が読み解ければ上空の気象条件が解ると言う意味であった。スキーは色々な結晶形態の降雪が地上に積もった積雪の上を滑るのであるが、この積雪も地上の気象条件の影響を受け刻々と変化する。気温の変化や日照により変化する外に、積雪の表面では昇華が起こり、積雪内部では地表の熱による対流で雪粒子の再結晶化が進行する。太陽光の熱は雪表面から 15 cm 程度の深さまでしか影響を与えない。寒冷地積雪は色々な雪が層状に重なっているが、春も近くなると全体がザラメ状となり、地面に近いところでは大きな霜の結晶となっていることに気が付いている読者も多いと思う。話題がそれるが、この大きな結晶は周りの雪との繋がりが弱く底雪崩の原因となる。新雪雪崩は積雪の層と層の間に繋がりの弱い状態が出来たときにおこる。スキーの話題に戻ると、一般に新雪は滑走性が悪く、降雪後時間が経過した方が良く滑る傾向にある。これは時間とともに周りの雪と凝着して雪粒子が動きにくくなることと、雪の結晶が丸く大きくなり単位面積当たりのスキーとの接点の数（真実接触面積）が減少するからである。その変化の速度は降雪の形状と地表の温度に大きく左右される。温度が高いほど変化は顕著となる。さらに、ザラメ雪が割合良く滑るのは、除雪抵抗は有るものの雪粒子が大きく接点の数が少ないためと考えれば理解できる。

<結論>

スキーが特別に良く滑る事は、凝着説を基礎に説明できると考えられる。スキーの滑走面に加工される所謂ストラクチャーやワックスの働きは今のところ摩擦融解説を基に説明されている場合が多いが疑問の残るところであり、実験を基礎にした定量的な研究が待たれる。

スキーに用いられる滑走面の材質や構造（表面粗さやストラクチャー）、ワックスを考える上で摩擦の原理を明らかにすることは重要であり、科学者としては是非とも明らかにしたいテーマである。さらに、屋根材、スタッドレス・タイヤや靴底など摩擦をコントロールする工学としても重要なテーマでもある。

<文献>

- (1) Joly, J., New Series, Vol. 5, Pt. 6, p453, 1887
- (2) Bowden F P and Hughes T P, *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Sci. A* 172 280, 1939
- (3) Tsusima K, *J. Glaciology*, 19, 81, 1977