氷筍リンクはどのように構想されたか

How Planned an Ice Staragmite Skating Rink ?

対馬 勝年*

Katutosi Tusima

1. はじめに

1972年の札幌冬季オリンピックから26年、日本で2度目の冬季オリンピックが長野で開催された。この間、日本は高度経済成長と国際化を成し遂げていた。これらを背景に力むことなく、自然体で行われたのが長野オリンピックのような気がする。

札幌オリンピックではリンクの氷質やスキー競技場の雪質、選手の筋電図や酸素摂取、ジャンプにおける姿勢と空気抵抗などについての科学研究が盛んに行われ、スケートリンクは -2°C 、スキーコースは 10^6 Pa ($=10\text{kgf/cm}^2$) 以上の硬さがよいという優れた研究成果を挙げた。

今回の大会ではスラップスケートの登場や、空気抵抗低減のストライプ、ジャンプのV形飛行など海外の新技术に翻弄された大会のような気がする。本オリンピックにおいても、雪工学の果すべき役割はあったのではないかと反省される。

雪が降ったり止んだり、風が強くなったり弱くなったりを繰り返すのも冬の天気である。そのような自然条件で行われるジャンプ競技などで「風をつかむ」とか、「降雪が滑りを悪くする」のが即座に飛距離や飛び出し速度という数字で示されると、これはフェアな競技なのだろうかと思いを傾げなくなった。

スケート競技においてもリンクの氷の状態が良くなければ好成績は望めない。天然の氷や人造のリンク、あるいは屋外パイピングリンクの時代にはリンクコンディションは自然条件に強く支配された。そんな中でロシアのメデオの氷が記録製造リンクとし

て知られた。1988年のオリンピックカルガリー大会で初めて室内スピードスケートリンクが登場し、新記録ラッシュに湧いた。その後のリレハンメル、今回の長野大会といずれも室内リンクで世界記録の更新が行われた。世界中のリンクでいかによく滑る氷を実現するかに凌ぎを削られているが、室内リンクは気温や風という外的条件から解放され、氷質コントロールが可能になったことで飛躍的な記録更新につながったと言えよう。

2. 「結晶面のコントロール」がなぜ今まで試みられなかったのか

スケートリンクの氷が直径5mm程度の小さな結晶粒の集まりであることは札幌オリンピックの頃から長野まで変わっていない。氷が結晶であることに注目すれば、結晶面をコントロールして滑りを向

スケートリンク（エムウェーブ）の氷の水平断面
スケールの一目盛は1mm、結晶粒の大きさは5mm程度

* 富山大学理学部地球科学科 教授

上させるといふ説明は極めて分かりやすい。なぜ、こんな単純なことが今まで試みられなかったのか不思議なくらいである。

学問の伝統ある欧米では、Bowden の摩擦融解説の考えに支配されて、結晶という考えまでは脱出できなかった点が指摘できるであろう。「解け水がスケートの滑りをよくする」という理論にとらわれている限り、結晶粒（結晶面）のコントロールというアイデアは生まれる余地がなかったからである。

一方、製氷の現場では気泡を含まない氷、不純物を含まない氷、氷表面の平滑度、氷温の調整などにもっぱら注意が向けられていた。

氷は結晶であり、結晶面によって摩擦が異なると言うことを氷の摩擦特性として評価できる人やそれがスケートの滑りに適用できることを理解する人が少なかった。また、たとえ結晶面による滑りのコントロールを認めても、広大なリンクを改造する具体策が見い出せずにいた。

氷筍リンクはこれらの難問を解決する糸口を与えた。

3. 三つのことが重なって単結晶リンクの可能性が見えてきた

スケートリンクを高速化する氷筍リンク構想は

- ① 単結晶氷の摩擦の異方性
- ② 氷筍の巨大単結晶粒化
- ③ 柱状構造をしたリンクの氷

の三つが揃って初めて提案された。

天然の氷筍（黒部峡谷のトンネル内）関西電力提供

一つは1970年以來の単結晶氷の摩擦特性に関する実験的研究から、温度や荷重、速度によって摩擦係数が異なるだけでなく、氷の結晶面や同一結晶面上でも滑り方位によって摩擦係数の異なることが明らかにされ、氷の基底面が各種の条件下で最も摩擦の小さい面であることが解明されていたことである。

二つ目は1980年に低温研から富山大に転任以来、中川正之教授のもとで行われた黒部峡谷の志合谷における雪崩研究のお手伝いが挙げられる。その際、志合谷のトンネル内で天然の氷筍に出会った。その氷筍の調査から、氷筍が巨大単結晶であることがわかった。これについては、その後、斉藤好弘君が卒研と修論のテーマとして詳細な研究を行い、氷筍の成長速度と供給水滴の滴下間隔、周囲温度との関係などを明らかにしていた。

三つ目は1997年4月に長野オリンピック記念アリーナ（エムウェーブ）のリンク氷が調査され、氷の結晶粒が滑走面に垂直な柱状氷になっていることがわかったこと。

①、②のことから氷筍を使えば、高速リンクを実現できることの提案は行われていた。しかし、その段階では具体的なリンクの作り方までは構想できいていなかった。③の事実が判明して、薄い板状氷をリンクに張り付け、その上に通常の製氷と同じ方法で氷の層を育成することによって、単結晶氷を作れるという確信が得られた。

4. 予備実験

氷筍リンクと通常リンクの滑りの違いを示すために実験室内に長さ1 mの氷のコースを2つ作り、スケートを滑らせる摩擦試験を行った。当研究室では野次郎兵衛の原理を応用して、氷の板の上にスケートの刃一本を立てて滑らせ、摩擦特性を調べる試験を行ってきたので、それを採用した。スケートをステンレスワイヤーで引きながら力を測定する。一定速度で引くのだが、氷表面に凹凸があるとスケートの滑りにむらが生じる。表面の微小な山のところでワイヤーに加わる張力が大きくなり、山を乗り越えた瞬間の反動でスケートは加速して前進し、摩擦が激しく変動する。このような変動を繰り返すと、氷

の種類による摩擦の違いを検出できない。最大3割にもおよぶ摩擦の違いは氷の表面をマイクロームで精密に平滑化することによってはじめて検出された。

常々「摩擦の研究は注意力との戦い」との自戒を再確認する結果となった。この試験結果を日本スケート連盟の組織する「エムウェーブ氷質プロジェクト」に報告し、単結晶リンクの提案を行うことになった。

5. エムウェーブ氷質プロジェクト

オリンピック出場選手の選考や選手強化に当たる日本スケート連盟は選手の希望を氷のリンクに反映させ、最大限に実力が発揮されるリンクを目指して「エムウェーブ氷質プロジェクト」を設置した。

競技種目によって選手の希望する氷質は異なる。直線部分とカーブでも氷質に対する要求は異なる。選手は「氷が硬すぎる」、「氷がねばっこい」、「力が氷に伝わらない」などといった感覚表現で氷質を評価する。このような言葉を氷質を表す物理量に翻訳し、最適氷質を探究していこうとするものであった。さらに、日本に初めて誕生した室内スピードスケートリンクを世界の高速リンクに仲間入りさせることもねらいであった。この氷質プロジェクトは研究の一環としてスケート滑走痕の採取とその解析も行った。これは結城巨啓コーチの発案によるもので、筆者らの行った痕跡の採取には富山県警鑑識課が開発した雪上の足跡採取技術が応用された。それは塩水で調合された石膏を流し込んで氷を解かすことなく表面の鋳型を得る方法であった。

6. 苦闘の始まりー氷筍作り

単結晶リンクは巨大単結晶の氷筍から切り出された薄板を敷き詰めて作られる。リンクを作るために氷筍を大量生産することが課題となった。

氷筍作りを開始したのは今年の7月であった。まず天然の氷筍の成長の仕組みに似せて、高い位置から水滴を落とす点滴装置の工夫から始まった。長短2本の細いチューブを通したシリコンゴムでペットボトルに栓をして「マリOTTの器」を作り、一定間隔で水滴を供給する工夫をしたり、サイホン装置で細管から滴を供給するようにしたり、あるいはボ

リバケツの底に細管を埋め込み、水滴を供給する試験などを行った。

次に、長さ10mのポリエチレン管に300mm間隔に細管を取り付け、多数の氷筍を育成する試験に進んだ。これらの試験を富山大の小さな低温室で行った後、長さ100mのポリエチレン管にやはり300mm間隔に細管を取り付けた水滴供給装置を4セット試作した。新庄雪氷防災研究支所に完成した最新鋭の低温設備を利用して大量生産システムを試験した。天井にも配管して水槽から水を送り出してみると、数か所で細管の根元から水が噴射する。ハンダゴテでポリエチレンを溶融し、漏れ部を塞ごうとするがなかなかうまくいかない。水分が除去しきれないため熱処理してもポリエチレンはボロボロになってしまうのである。それでも辛うじてうまく行くこともあるので、再度水を流して、再検査の繰り返しが続いた。まるで人工降雨の中での作業であり、

科学技術庁新庄雪氷防災研究支所に作られた氷筍育成装置

同上育成装置で作られた氷筍

下着まで濡れてしまう。実験が夏場であったのが救いであった。

ようやく水漏れ問題が一段落し、いざ氷筍の育成という段階に入った。しかし、そこでもまた床が水溜りになるだけで氷が育たない。気温を -3°C から -6°C まで下げると、今度は細管の凍結が始まるというトラブルが続く。指の体温で暖めて解かすが、次々に別のところの細管が凍結するのでいちごっこであった。滴下部からは目を離せなかったので、昼夜交替で世話をした。指先の作業であり、先があかぎれのように割れて痛みを感じるようになる。気温を上げると氷は育ちにくい、凍結する細管の頻度は少なくなるのが救いであった。

何とか氷筍を育てたいという一心から氷のブロックを水滴の落下位置において成長を試みた。このような3日3晩の苦闘の末、ようやく氷筍が育つようになった。二段に組んだ下段ではそれでも氷筍の育ちが悪かった。後でわかったことだが床が冷えるのに時間を要し、わずか0.08g程度の水滴が幾ら間欠的に落下しても氷にはなれなかった。太さ10mm、長さ100mの送水管は表面積が 3.8m^2 もあって、外気で冷やされ、管の入口と出口で 4°C も水温が変わってしまう。急速、防災研の好意で断熱チューブを被せることになった。このような苦労の末にはじめて氷筍は快く育つようになった。天井が高く大きな低温室は抜群に優れた温度コントロールであったが、風を動かす強制冷却式なので一点から滴下する水滴も狭い範囲に散らばって落下し、太い氷筍になった。試験最終日に当たる7日後には予想外とも言える高さ0.3~0.6mの大きな氷筍が得られた。

一応、上・下段で各300個の滴下口をもつ氷筍育成装置のテストが済んだ。

次回はちょうど1月後の10月に1週間の予定で単結晶の氷筍製作を目指したテストが行われた。同じく2段に組んで行ったが、パイプの長さは各50mに短くした。これは、一個一個の氷筍に目を配り単結晶に育てることに主眼を置きたかったからである。

これらの研究経過は地元のマスコミやNHKテレビにも取り上げられ、オリンピックを目指した研究が施設・資金面で窮地に陥っていることもアピール

された。その呼び掛けに応えるかのように関西電力㈱の一行が大阪や富山から新庄にかけつけ、次の大量生産へ向けた支援が与えられたのであった。

7. 黒部のトンネルでの氷筍製作

幅8m、一周400mのスケートリンク（競技レーン）は $3,200\text{m}^2$ の面積を持つ。薄く切断した氷筍の直径が約150mmなので、断面積は 0.018m^2 、リンクに敷き詰めるには18万枚が必要になる。氷筍1本から40枚切り出されるとしても4,500本の氷筍が要る勘定である。このような大量の単結晶氷筍を育成することが次の課題となった。600本ずつ8回作っても良いが1回の育成に3週間もかかるので、この施設ではオリンピックに間に合わない。

新庄で打合せをした後で、10月下旬に再度来訪された関西電力㈱から示されたプランは度肝を抜くものであった。計画はトンネル内に長さ200mの人工冷凍室を作り、6,000本の氷筍を一気に育成すると言うもので、水供給パイプの長さが1.5km、温度コントロール用冷却パイプの長さは3kmという壮大なものであった。その後、富山県自然保護課や営林署の許可を得て、黒部ダム近くの赤沢横坑出口付近（標高1357m）に施設を作ることになった。氷筍育成施設は幅2.6m、長さ190m、天井までの高さ1.8mという壮大なものになった。冷凍機と配管、温度制御は㈱精研の生頼取締役の好意を受けることになった。トンネルは幅が狭いので、このような施設を作るのは大変危険な作業であり、奥の方から順番に冷凍機や器材装置を据え付けていかなければな

氷筍の大量育成（長さ190mに4800本を育成）

らない。多いときには100人もの作業員で断熱材の張り付け、給水配管、冷凍配管、電気工事等に当たった。供給水も数 km 離れたトンネル湧水をパイプで引いて使用することになった。

人工氷筍製造室では塩ビパイプに4800個の滴下口を設け、4台のポンプで送水した。パイプは内径20mm と太かったため、往きと戻りの温度差は1℃以内であった。冷却パイプは両側壁部分に配管した。庫内を温度成層させ、床の方を冷却し、天井の方は水の滴下口が凍らないようにプラスの温度に保つ目論見であった。しかし、これはうまくいかず、滴下口が頻繁に凍結し、氷の除去や解凍に苦勞することになった。新庄での悪夢の再現となり、以降、昼夜交替24時間体制でいつ果てるともない氷筍との闘いが行われることになった。

さて、氷筍がどうにか育つようになると、次は結晶の成長方向のコントロールが問題になった。氷筍を根元付近で切り取り、そこに種水をつけて、単結晶の氷筍を育てるのである。単に柱状の氷を作るのと異なり、成長軸を結晶の主軸(c軸)方位に揃えた単結晶に育てるという高度な結晶育成に入ったことで一段と苦勞が加わることになった。

良好な成長を続ける氷筍は先端に傾斜した平滑面をもつことが多かった。平滑面に衝突した水滴は周囲に広がって、氷筍を成長させる。

平滑面が窪み始めるときは水量が多いため融解に入っていることを意味し、逆に、先端が乾いて光沢を失っている場合は水の供給不足を意味する。このように氷筍先端の様子を読むことによって、成長状況が推察され、滴下口の調整を行えるようになった。

8. 理論の実証

氷筍が出来ると、次はリンクでのテストである。そこで、リンクに張るための薄板を切り出すことになった。バンドソーを用いて切り出すのだが、1枚30秒かかったとしても、24時間で2,880枚、3万枚を切り出すには10日も要る。5台のバンドソーを用い、結晶面を確認する人、切断する人、箱に詰める人と3人1組で昼夜突貫の切り出し作業が10日ほど

スケートリンクへの氷筍の張り付け

続いた。始めは偏光装置や赤外線ランプによる結晶面の確認に手間取り、なかなか進まなかった。しかし、3,4日もするとようやくスピードアップが図られるようになった。

このようにして用意された3万枚余の氷筍が長野県野辺山にある帝産アイススケート・トレーニングリンクに張り付けられた。ダンボールに梱包された薄板が冷凍車2台で運ばれ、富大学生、関電、関電興業の関係者ら76名によって張り付けられていった。史上初の作業と思われるが、一夜で張り付けることを目標に掲げたとおり、実質4時間程度で張り終えた。翌12月24日にはテストスケートによる摩擦係数の測定が行われ、氷筍リンクで2割の摩擦係数の低減が実証された。この測定には26年前の札幌オリンピックに際して開発されたカタパルト式摩擦試験機が筑波大から提供された。

9. 氷筍リンクの意義

氷筍リンクは凝着説に立脚して提唱されている。一周400mもあるリンクの全体に氷の(0001)面を敷き詰め、高速リンクを実現しようというのが本研究の目的であった。未だこの目論見は完成していないが、トライボロジー(総合摩擦学)の立場からすれば摩擦コントロールの壮大な試みと言うことになる。

前世紀末からスキー・スケートの摩擦機構の議論が行われ、今日なお摩擦融解説や凝着説が対立して決着を見ていない。このような断言をすると、「摩

擦融解説」を支持する欧米の科学者の反論が聞こえてくるような気がする。スケートの滑りが解け水の潤滑によるのかそれとも上のような氷の力学的特性によるのかの問題は容易に解決を見そうにない。しかし、筆者はスケートの極端とも言える低摩擦は「氷が金属のように硬いの、せん断には極めて弱い」ことに原因があるので、固体間の凝着説で説明できると主張してきた。氷筍リンクが世界最高速リンクであることを競技記録の面から立証することによって、その根拠となった凝着説の正しさを裏付けようとするものである。このような困難な問題に対し、実証によって審判を下そうというのが氷筍リンクの試みである。実証とは言っても世界記録の更新以外に実証に値するものはないであろう。すでに述べてきたように、その実証も選手の技能、道具としてのスケート、氷結晶面以外にもリンクの平滑度、透明度、温度コントロールなど多くの要素が最良の状態にある時に初めて成し遂げられることである。

解け水を発生させるには熱（摩擦熱）が必要である。発生する摩擦熱が大きいとき、厚い水膜が形成されるであろう。このように考えを進めると、「水膜が出来るからよく滑る」というのと「摩擦が小さい」というのは自己矛盾であることに気づく。発生する熱が不十分で氷の融解が発生しないような場合にはどうなるのであろうか？スケートでは動摩擦係数が0.005程度で通常の物質の値に比べ二桁小さい。これは温度を一桁低い -50°C とし、速度も一桁遅い 1.5m/s 、摩擦係数を0.5としたのと等価である。このような摩擦面で融解が発生し、流体潤滑になると想像するのは難しい。つまり、「スケートでは摩擦係数が小さすぎて、発生する摩擦熱が少なく、氷を解かせない。言い換えると、氷が解けないからスケートはよく滑る」とは考えられないものだろうか。「解け水が発生するほど摩擦が大きいときは、逆に滑りが悪い」と言われる日が近づいているような予感がある。

10. おわりに

校正段階で今年のエムウェーブへの氷筍採用正式決定のニュースが入った。試練の窓口が開かれたこ

とで、今まで漠然と考えていた記録への挑戦が重くのしかかってくるのを感じる。

リンク高速化のために、結晶面コントロールによる摩擦低減は欠くことの出来ない条件であるが、扉の開かれた今となっては、さらに、加速しやすい氷、高速コーナリングを可能にする氷など、選手の技能が最大限に発揮されるようにリンクの側から支援する氷結晶の探究が必要になったと痛感している。

読者の中には原始的手法によるリンク改造の実用性に疑問を持つ方も少なからずいると思う。同じ疑問はリンク開発に携わった者が身をもって痛感してきたところでもあった。もっと簡単に高速リンクを実現できないものか？このような疑問に応えるために、実用性の高い第二世代高速リンクの探究も始まっていることを付け加えておきたい。最後に、氷筍リンクに興味を持つ方への参考文献¹⁻⁵⁾を追加しておく。

本研究を遂行するに当り富山大学地球科学科学生、科学技術庁新庄雪氷防災実験研究支所（佐藤篤司所長）、関西電力^(株)土木建築室中村幾雄副部長、同北陸支社木内敏裕副長、吉川太副支社長、関電興業^(株)今村善二副支社長、日本スケート連盟山崎善也理事、結城匡啓オリンピック選手強化特別コーチ、長野市、エムウェーブ、帝産アイスケートトレーニングセンター、マスコミ各社そのほか多くの方々のご支援を受けたことを記して深甚な謝意を表したい。

参考文献

- 1) 対馬勝年・中川正之・川田邦夫：氷筍。雪氷，45，1983，197-200.
- 2) 対馬勝年・斉藤好弘：氷筍の人工育成。富山県地学地理学論集，11，1996，142-147.
- 3) 対馬勝年：よく滑る氷、滑らない氷とは？化学，53，2，1998，18-20.
- 4) 対馬勝年：長野オリンピックにみるトライボロジー技術。月刊トライボロジ，12，1，1998，46-47.
- 5) 対馬勝年：スケートリンクの氷。エネルギーレビュー，18，7，1998，8-11.