

解説・総説

# カーリングと氷物性

前野 紀一<sup>1)</sup>

## 要 旨

カーリング競技では、重さ約 20 kg の円盤状のストーンを滑らせ、氷上のハウスにより近づけることを競う。ストーンは中央が窪んでおり、氷にはごく狭い面積で接触する。また、氷表面は滑らかでなく、ペブルと呼ばれる無数の細かい突起からなっている。その結果、氷に働く圧力は非常に大きく、ストーンは滑り、通常の滑らかな摩擦の他に、ペブルが変形・破壊する摩耗の効果を伴う。しかし、これがカーリング競技の難しさと魅力の源であり、同時に氷物性として解決すべき幾つかの課題を提供する。本稿では、ストーンは滑りに関係する、氷の摩擦係数、ペブル、ランニング・バンド、スウィーピングについて簡単に解説し、最後にカーリングの最大の難問「ストーンが曲がる(カールする)のはなぜか」について議論する。カールの物理メカニズムとしてこれまでに提出された「圧力差モデル」、「水膜モデル」、「雪かきモデル」等がいずれも完全ではないことを示したあと、新しい理論である「蒸発摩耗モデル」を紹介する。蒸発摩耗モデルは、これまでどのモデルも説明できなかった、カーリング選手達の経験「カール距離はストーンのリターン数にあまり関係しない」を説明する。

キーワード: カーリング, ペブル, 摩擦係数, 蒸発, 摩耗

Key words: curling, pebble, friction coefficient, evaporation, abrasion

## 1. はじめに

カーリングがオリンピックの正式種目となったのは 1998 年の長野冬季オリンピックの時であるから、まだ 12 年の歴史しかない。しかし、スポーツ競技としての歴史は古く、カーリング発祥の地である英国スコットランドでは 16 世紀初期の記録が見つかっている (ルクウィッチら, 1985; 高橋・野々宮, 1997)。カーリング競技は、4 人ずつ 2 チームで行われ、28.3 m 先のハウスと呼ばれる円をめがけて各チームが交互に 8 回ずつストーンを氷上に滑らせる。ストーンをハウスの中心により近づけたチームが得点を得る。これを 10 回繰り返す、総得点で勝敗を競う。肉体的スポーツとしての技術だけでなく、高度な理詰めと戦術が要求されるため「氷上のチェス」とも呼ばれる (小林, 1986; 益子, 1998)。

氷上におけるストーンの滑り運動は氷の物性に

深く関係している。本稿ではカーリングと氷物性に関係する次の 5 つのトピックスについて述べる。

1) 氷の摩擦係数, 2) ペブル, 3) ランニング・バンド, 4) スウィーピング, 5) カール。次の第 2 節では 1)~4) について簡単に解説し、第 3 節と第 4 節では 5) のカールのメカニズムについて述べる。

## 2. カーリング・ストーンの滑りと氷物性

### 2.1 カーリングと氷の摩擦係数

カーリング競技では、重さ約 20 kg、直径約 30 cm、高さ約 15 cm の円盤状のストーン (花崗岩) を滑らせ、ハウスと呼ばれる円の中心により近づけることを競う。ストーンに働く空気抵抗は小さく氷の摩擦に比べて無視できるので、ある初速度でデリバリーされた後ストーンに働く外力は氷の摩擦のみと考えることができる。従って、ストーンの運動は初速度と氷との摩擦で完全に決まる単純な力学となるはずであるが、問題はそれほど簡単でない。

1) 北海道大学名誉教授

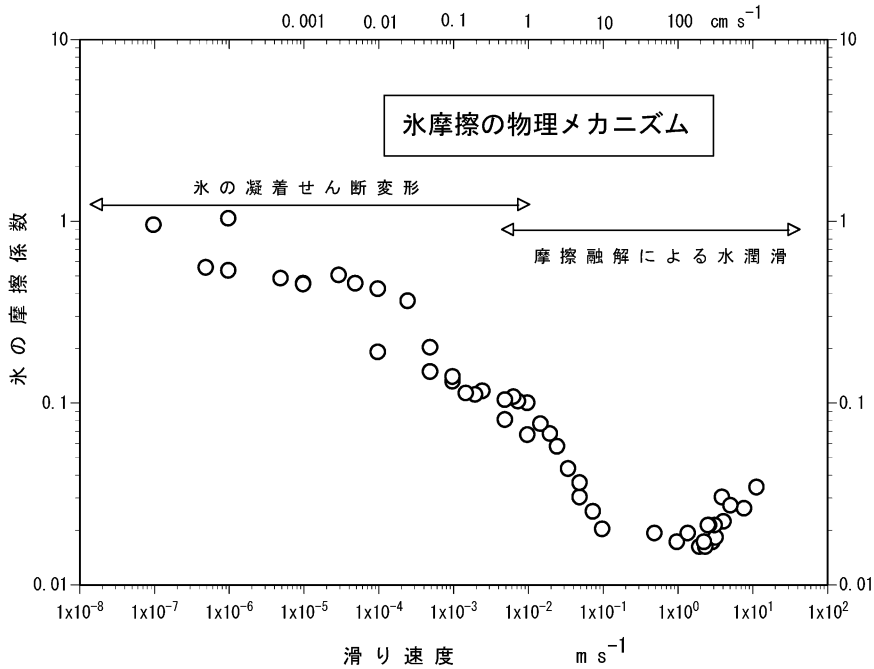


図 1 氷の摩擦係数と摩擦メカニズム。  
 いろいろな研究者によって温度 $-10^{\circ}\text{C}$ で測定された氷・氷摩擦係数をまとめたもの。  
 Maeno *et al.* (2003), Maeno and Arakawa (2004), 前野 (2004) の図を改変。

ストーンのデリバー速度はおよそ  $1\text{--}5\text{ m s}^{-1}$  である。図 1 に示したように、この速度領域における氷の滑りメカニズムは「摩擦融解による水潤滑」である (Petrenko and Whitworth, 1999; 前野, 2004; Maeno *et al.*, 2003)。すなわち、この速度領域では、ストーンに接触した氷表面に瞬間的に薄い水膜が発生し、それが潤滑剤として働く。その結果、氷は非常に滑りやすく、摩擦係数の値は非常に小さい (およそ 0.01)。

しかし、ストーンの速度が減少するに従い、氷の摩擦係数は増大する。例えば  $-10^{\circ}\text{C}$  の場合摩擦係数は 0.01 という小さい値から速度の減少とともに増え、1 に近づく。ストーンが停止する前のこの速度領域では、滑りのメカニズムは既に水潤滑ではなく、「氷の凝着せん断変形」である。つまり、ゆっくり運動するストーンに凝着した氷表面にはストーンの動きによってずり応力が加わり、薄い氷層がゆっくりとせん断変形することによって滑る。

このように、ストーンのデリバーから減速し停止するまで、氷の摩擦係数は 0.01 から 1 まで、すなわち 100 倍も変化する。また、氷の摩擦係数は温

度によっても大きく変る。後で述べるスウィーピングのテクニックは、この特性を利用してストーンの滑りの速度や方向をコントロールする。カーリングの選手たちが示す微妙な技術や操作はそれぞれが氷の物理的性質を巧みに利用したものであり、カーリング競技の面白さと魅力の源となっている。

## 2.2 ペブルとランニング・バンド

カーリング競技はアイスシートと呼ばれる氷面で行われる。アイスシートの表面は平らではない。表面にはペブル (pebble) と呼ばれる無数の細かな氷の突起が並んでいる。氷の突起は、滑らかに仕上げられた氷面に細かな水滴をスプレーしてつくられる。水滴は氷面で凍り細かなペブルとなる。ペブルの大きさはいろいろであるが、平均的にはおよそ高さ  $1\text{--}2\text{ mm}$ 、直径  $3\text{--}10\text{ mm}$ 、先端直径  $1\text{--}2\text{ mm}$ 、面密度  $1\text{ cm}^2$  あたり  $2\text{--}5$  個 ( $2\text{--}5\text{ cm}^{-2}$ ) である。

カーリング競技で使われる標準的なストーンは、英国のスコットランド産あるいはウェールズ産の花崗岩で、底面は真中が凹んだ皿状になっている (図 2)。氷と接触するのは細い帯状のランニング・



図 2 ストーンの写真。  
右はストーンの裏側。中央は窪んでおり、ドーナツ状のランニング・バンドは、直径およそ 13 cm, 幅およそ 5 mm.

バンドである。バンドの直径はおおよそ 13 cm で幅はおおよそ 5 mm である。従って単純に計算すると、ランニング・バンドにかかる圧力は 0.1–0.16 MPa (約 1–1.6 気圧) ということになる。しかし、ランニング・バンドが実際に接触するのはアイスシート表面のペブルであるから、ペブル先端にかかる力はもっと大きい。平均的におおよそ 20–100 個のペブルがストーンを支えていると考えられるから、ペブル先端に発生する圧力は 0.4–8.1 MPa (約 4–80 気圧) となる。

結局、底面のランニング・バンドに接触する氷 (ペブル) には平均して数 MPa (数 10 気圧) の圧力がかかっていることになる。この事実は二つの意味を持つ。一つは、氷の摩擦係数が圧力によって減少することと関係している (Evans *et al.*, 1976; Oksanen and Keinonen, 1982)。アイスシート上でストーンがよく滑るのはこのためと考えられる。先年筆者が制作に協力した NHK のテレビ番組「インシュタインの眼 (2008 年 12 月 4 日放映)」では、同じアイスシート上で、一方はペブルのない平らな氷面、一方はペブルありの氷面を作成し、同じストーンを同じ速度で滑らせる実験を行った。結果は、前者は 11 m で停止したが、後者はそれより 17 m 遠くの 28 m で停止した。ペブルの存在が氷の摩擦抵抗を減らし、ストーンをより滑りやすくしたことが明白である。

もう一つの意味は、ペブル先端には数 MPa、つまり 1 cm<sup>2</sup> あたり数 10 kg という大きな荷重がかかっているため、ストーンの滑りは、滑らかな摩擦だけではないという点である。ストーンの通過により氷そのものが破壊したり変形する「摩耗 (abrasion)」の現象が起きている。事実、カーリング競技の進行に伴い、ペブルは削られ、アイスシート上

には細かな氷屑が生成する。後で述べるように、氷屑はストーンの運動に重要な影響を与える。

### 2.3 スウィーピング

ストーンの進行前面のアイスシートをブラシやホウキ (ブルーム) でこするスウィーピング (sweeping) の動作は、カーリング競技の魅力の一つである。スウィーピングは、そもそもは、存在する前面のゴミや異物を取り除くのが目的であるが、上述したように、ランニング・バンドによるペブルの摩耗で生じた細かな氷屑を取り除くためでもある。

更に、スウィーピングが急速往復運動の場合には、発生した摩擦熱はペブル表面を暖める。氷の摩擦係数は温度上昇で減少し、滑りやすくなるから、これもストーンの運動をコントロールする有効なテクニックの一つとなる。

### 3. ストーンが曲がるメカニズム

ストーンがなぜカール (curl, 曲がる) するのは昔から問題であったが、それに対する科学的説明が与えられたのは 1980 年代になってからである。ストーンに反時計方向 (左回り) の回転 (ターン) を与えると左へカールし、時計方向 (右回り) のターンを与えると右へカールするから、カールにターンが関係していることに疑いはない。しかし、なぜそうなるかはなかなかの難問である。これまでに発表されたいろいろな報告を紹介する前にストーンが曲がる力学を復習しておく。

図 3 はランニング・バンドの模式図である。ストーンの滑走速度を  $V$ , 回転速度を  $\omega$  とする。ランニング・バンド上の任意の点  $F$  (角度  $\phi$ ) における速度ベクトルと合成ベクトル、およびそれと反対方向に作用する氷の摩擦力 ( $F_F$ ) を示した。 $F_F$  は  $F$  の対称点  $R$  における摩擦力  $F_R$  と絶対値は同じであるが、 $y$  軸に対して同じ角度で向きが逆であるから、 $F_F$  と  $F_R$  の合力は  $-y$  方向のみの力となり、進行方向に垂直な  $x$  方向の力は相殺する。速度が変われば摩擦係数が変わること (図 1) を考慮しても事情は変わらない。ただ、この場合左右 ( $\phi=0$  と  $\phi=\pi$  (180 度)) の摩擦力の差は大きい、その合力は  $y$  軸方向の成分しか持たないので、ストーンをカールさせることはできない。

野球ボールやゴルフボールの連想から、左右の

速度の違いが曲がる原因と考える誘惑にかられるが、それではストーンの曲がりの説明することはできない。また、スキーやスノーボードとは違い、カーリング・ストーンの場合、エッジング作用で進行方向に直角の力が生みだされることはない。

#### [圧力差モデル (Pressure-difference model)]

カールの物理的説明を最初に試みたのはカナダのジョンストンである (Johnston, 1981)。彼は、ガラスを逆さまに伏せてテーブルの上を滑らせると、反時計方向 (左回り) の回転では右へ、時計方向 (右回り) の回転では左へカールするメカニズムをカーリングに適用した。ガラスの場合、ガラス底面の進行方向前部には後部よりも大きな力がかかると考えられる。このため前部の摩擦力 ( $F_F$ ) が後部の摩擦力 ( $F_R$ ) より大きくなり、その合力として進行方向に直角な正味の力 (反時計方向の回転では右向き) の力が生まれ、カールする。

彼は、氷の場合、圧力の増加で前部の氷がより多く融解し  $F_F$  が  $F_R$  より小さくなるため、ガラスの場合と逆方向に曲がると考えた。しかし、これは正しくない。なぜなら、氷摩擦の研究によると、氷の摩擦係数 ( $\mu$ ) は圧力 ( $p$ ) の増加で減少するが、圧力依存性は  $\mu \propto p^{-1/3}$  (Evans *et al.*, 1976) あるいは  $\mu \propto p^{-1/4}$  (Oksanen and Keinonen, 1982) である。従って、ストーンの運動に関与する摩擦力 ( $F$ ) は  $F \propto \mu p \propto p^{2/3}$  あるいは  $F \propto \mu p \propto p^{3/4}$  となる。すなわち、ストーンの場合も、前部の圧力が後部のそれより大きければ、摩擦力も前部が大きくなり ( $F_F > F_R$ )、彼が考えたように逆になることはない。「圧力差モデル」の間違ひは、摩擦係数の減少を摩擦力の減少とみなした結果と考えられる。

#### [水膜モデル (Water-layer model)]

シェゲルスキーたち (Shegelski *et al.*, 1996) が提出したモデルをここでは「水膜モデル」と呼ぶことにする。彼らは、ランニング・バンドと氷の摩擦によって生じた水膜はストーン回転によって引きずられ、回転が反時計方向の場合は右前面に、時計方向の場合は左前面に集められ、前部の摩擦係数を減少させると仮定した。その結果、 $F_R$  が  $F_F$  より大きくなりストーンは正しい方向にカールすると考えた。ストーン運動を計算するために、彼らは摩擦係数が次の形で与えられると仮定した (Shegelski, 2000)。

$$\mu = \mu_0(1 - f_0 \sin \phi) \quad (1)$$

ここで、 $\mu_0$  と  $f_0$  は正の定数、 $\phi$  はランニング・バンド上の位置を示す (図3参照)。

水膜モデルにおける水膜は、ストーンに引きずられて前部に集まる水であるから、通常の氷物性で知られている摩擦によって生じるミクロな水膜とは異なり、もっと厚いマクロな水と考えられる。しかし、それは仮定された水膜であり、そのような水膜の存在は確かめられていない。また、そのような水が前部のランニング・バンドに集まる合理的な物理メカニズムはまだ提出されていない。

シェゲルスキーたちの水膜モデルは、しばしばジョンストンの圧力差モデルとまぜこぜの形で紹介されているが (例えば、小川, 2006)、上述したように両モデルは別の理論である。

#### [雪かきモデル (Snow-plow model)]

デニー (Denny, 2002) が提出したモデルを「雪かきモデル」あるいは「粒子モデル (Granular model)」と呼ぶことにする。彼は、ランニング・バンドで削られて生じた氷屑は前部に集まり、その結果、前部の氷の摩擦係数が減り、 $F_F < F_R$  となると考えた。

このモデルには少なくとも二つの疑問があげられる。一つは、氷屑が後部から前部へ集められる

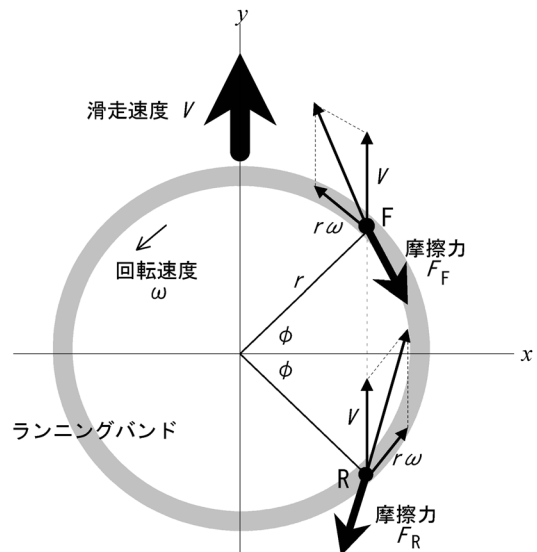


図3 ランニング・バンド上の2点 (F と R) における速度と摩擦力。

メカニズムはなにかという疑問であるが、これは本質的には水膜モデルに対する疑問と同じである。もう一つは、氷屑が集まると摩擦は実質的に氷・氷摩擦となり、摩擦係数の値は小さくなると仮定しているが、氷・氷摩擦係数の実測(安留ら, 1999: Maeno *et al.*, 2003)によれば、そのような減少は見られない。次節で述べるように、氷屑はストーンの運動にはむしろ抵抗(摩擦力)として働く。**[その他のモデル]**

カールに関してはこの他にもいくつかの報告がある。Denny (1998, 1999) はストーンの回転によって生じる左右の速度差が摩擦力の差を生み、回転トルクを生じてカールするモデルを提案した。対馬 (2009) も同じような考えを述べている。しかし、本節の初めに述べたように、左右の速度差を考慮した摩擦力の合力はストーンの進行方向の成分のみで、ストーン重心の運動を減速させるが、進行方向をかえる外力とはなりえない。

Penner (2001) は左右の付着力の差による効果(彼はピボット効果と呼んでいるが内容は不明)の可能性を示唆したが、まだ詳しいモデルは組み立てられていない。しかし、Maeno and Arakawa (2004) が示したように、低速度の氷の摩擦に焼結の寄与が重要となることを考慮するならば、これは将来もっと検討すべきモデルと考えられる。

#### **[モデルに要求される条件]**

以上簡単に紹介したように、カールを説明する物理メカニズムはいくつか提出されているが、完全な理論はまだない。モデルを満たすべき条件は次の二つである。

- A) ストーンは反時計方向(左回り)の回転で左へ、時計方向(右回り)の回転で右へカールする。
- B) カールする距離(度合い)は回転の大小であまりかわらない。

B) はカーリングの選手や経験者たちの感想であるが、これを示すデータを図4に示した。これは、ストーンがハウス付近で止まるように速度と回転をコントロールして投げた時のカールの距離を測定したものである。回転数が1回転以下のデータ2点は不正確なので除くと、ハウスに到達するまでの全回転数が0から12回転までかわっても、カールの距離は0.7-1.3 mの範囲に集中し

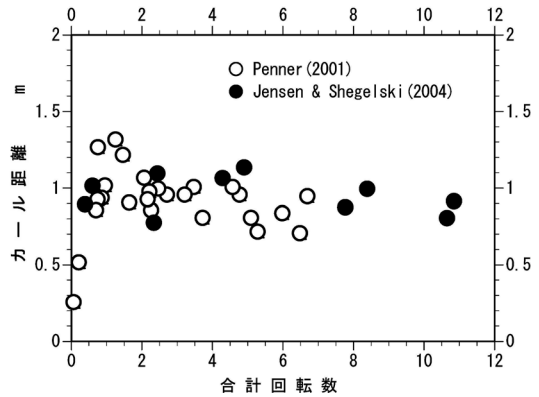


図4 カール距離と合計回転数の関係。データはPenner (2001)とJensen and Shegelski (2004)の図から読みとった値。彼らの測定はストーンがハウス付近で停止するような速度と回転速度の組合せで行われた。

ており、経験と一致する。これまでに提出されたモデルは、いずれも回転数(回転速度)の増加とともにカールの距離は増えるから、条件B)を満たしていない。次節で述べる「蒸発摩擦モデル」は条件A)とB)両方を満足する。

## 4. 蒸発摩擦モデル

蒸発摩擦モデルは、氷物性に関するカーリングの二つの特徴、すなわちペブルとランニング・バンド、に力点を置いた理論である(前野, 2009)。モデルの詳細は別に報告したので(Maeno, 2010)、ここでは要点のみを解説する。

### 4.1 ランニング・バンド前部と後部の氷の温度

速度  $V$  および回転速度  $\omega$  で滑るストーンを考え、ランニング・バンドが接触する任意のペブル(F)に着目する(図3)。ストーンの中心を直角座標の原点、ストーンの進行方向を  $y$  軸、それに直角方向を  $x$  軸とする。またFが  $x$  軸となす角を  $\phi$  とする。前面のランニング・バンドが通過すると、時間  $t = 2r \sin \phi / V$  ( $r$  はランニング・バンドの半径)の後、Fは後面のランニング・バンドと角度  $2\pi - \phi$  の点(R)で接触する。 $t$  は10~100 msのオーダーである。

Fではランニング・バンドとの接触で瞬間的に摩擦熱で熱せられ薄い水膜が発生するが、次の瞬間、蒸発の潜熱によって温度が下がると仮定する。温度降下量  $\Delta T$  は次のように見積もられる。



$$\Delta T = \frac{(Jst)L}{cds\rho} = \frac{JLt}{cd\rho} \quad (2)$$

ここで、 $J$  はペブルからの蒸発速度、 $s$  はペブル先端の接触面積、 $L$  は蒸発の潜熱、 $c$  は水の熱容量、 $\rho$  は水の密度である。 $d$  は蒸発による温度変化が時間  $t$  の間に及ぶ氷層の厚さで  $d \approx (D_{\text{heat}} t)^{1/2}$  で近似すると ( $D_{\text{heat}}$  は水の熱拡散係数)、値は 0.1–0.5 mm のオーダーである。

蒸発速度は、水分子の拡散で律速される場合と、水分子の分子運動で決まる場合の二通りで見積もることができる。前者の場合、ストーンは回転しながら滑走しているから、水蒸気の分子拡散だけでなく、いわゆる強制対流も考慮する必要がある。最終的に次式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta T &= 8.94 \times 10^{-3} f \Delta C \sqrt{\frac{\sin\phi}{V}} \\ &= 8.94 \times 10^{-3} \Delta C \left(1 + 2.2\sqrt{V+r\omega}\right) \sqrt{\frac{\sin\phi}{V}} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta C$  は水蒸気密度勾配、 $f$  は通風係数である。しかし、式(3)で計算される温度降下は  $10^{-5}^{\circ}\text{C}$  という小さな値となる。ペブルがストーン前面で摩擦されたあと後面で再び摩擦されるまでの短時間では拡散による水蒸気蒸発が十分起らないことを示している。

蒸発速度が氷表面の分子運動で律速される場合はより現実的である。固相と気相が平衡しているとき固相への分子の衝突個数は気体分子運動論から  $P(2\pi mkT)^{-1/2}$  と求まる。 $P$  は平衡蒸気圧、 $m$  は分子の質量、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度である。平衡状態では、衝突数と蒸発数は等しいと考えられるから、これは蒸発の最大値を与える。氷表面の水蒸気圧を  $P_0$ 、近傍の空気の水蒸気圧を  $P$  とすると、氷表面からの昇華蒸発速度は、アボガドロ数 ( $N$ )、気体定数 ( $R=kN$ )、水の分子量 ( $M$ )、および蒸発係数  $\alpha$  を使って次式のように書ける。

$$\begin{aligned} J &= \alpha \frac{M}{N} (2\pi mkT)^{-1/2} (P_0 - P) \\ &= \alpha \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{1/2} (P_0 - P) \quad (4) \end{aligned}$$

最終的に温度降下量は

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{JLt}{cd\rho} = \frac{JL}{c\rho} \left(\frac{t}{D_{\text{heat}}}\right)^{1/2} \\ &= \frac{\alpha L}{c\rho} \left(\frac{r\sin\phi}{D_{\text{heat}}V}\right)^{1/2} \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{1/2} (P_0 - P) \quad (5) \end{aligned}$$

と表される。数値を入れると、

$$\Delta T = 0.024(P_0 - P) \sqrt{\frac{r\sin\phi}{V}} \quad (6)$$

となる。例えば、 $P_0$  を  $0^{\circ}\text{C}$  における飽和水蒸気圧 ( $P_0=610\text{Pa}$ )、また近傍の水蒸気圧を  $-4^{\circ}\text{C}$  の飽和水蒸気圧 ( $P=437\text{Pa}$ ) とすると、 $r=6.5\text{cm}$ 、 $\phi=\pi/2$ 、 $V=4\text{m s}^{-1}$  のとき  $\Delta T=0.52^{\circ}\text{C}$ 、 $V=1\text{m s}^{-1}$  のとき  $\Delta T=1.94^{\circ}\text{C}$  となる。

結局、ストーンが速度が  $1\sim 4\text{m s}^{-1}$  の場合、ペブル表面からの蒸発のためランニング・バンドの後部の温度はおおよそ  $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$  前部より低くなること結論される。

#### 4.2 ランニング・バンド前部と後部の氷摩擦係数

上の計算で明らかにされたように、滑走中のランニング・バンドの前部と後部の氷には温度差があり、前部と後部で摩擦係数の値が異なる。氷の摩擦係数は温度、速度、圧力(荷重)等の関数であるが、カーリング競技が行われる一定範囲の温度、速度、圧力領域においては近似的に次の関数で表現できる。

$$\mu = Ap^{\alpha}(T_M - T)^{\beta} V^{\gamma} \quad (7)$$

$A$  は定数、 $T_M$  は氷の融解温度、 $p$  は圧力(単位面積当たりの力)である。べき指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は理論と実験で確かめられている値 ( $\alpha=-0.33$  あるいは  $-0.25$ 、 $\beta=1$ 、 $\gamma=-0.5$ ) を使う。

ランニング・バンド前部の点(F)の温度を  $T_F$ 、摩擦係数を  $\mu_F$ 、後部の角度  $2\pi-\phi$  の点(R)の温度を  $T_R$ 、摩擦係数を  $\mu_R$  とし、また  $T_R = T_F - \Delta T$  と仮定すると

$$\mu_R = \mu_F \frac{T_M - T_R}{T_M - T_F} = \mu_F \left(1 + \frac{\Delta T}{T_M - T_F}\right) \quad (8)$$

を得る. ここで  $T_F$  をカーリング場の平均的な氷表面温度と仮定した. 根拠は, ランニング・バンドの摩擦でペブルの先端は熱せられるが, 発生する摩擦熱が仮にすべて融解に使われたとしても融ける氷層の厚さは 160 nm に過ぎないからである. 先端は摩擦熱で薄い水膜が発生し蒸発による水蒸気源となるが, ペブル全体の温度は変わらないと考えられる. 結局,

$$\frac{\mu_R}{\mu_F} = 1 + 0.024 \frac{P_0 - P}{T_M - T_F} \sqrt{\frac{r \sin \phi}{V}} \quad (9)$$

となる.

上で求めた  $r = 6.5 \text{ cm}$ ,  $\phi = \pi/2$ , 温度  $-4^\circ\text{C}$  の時の値を使うと, 後部ランニング・バンドの摩擦係数は前部よりそれぞれ 26% ( $V = 1 \text{ m s}^{-1}$ ) および 13% ( $V = 4 \text{ m s}^{-1}$ ) 大きい. ランニング・バンド上の他の場所の摩擦係数を図 5 に示した. 図から明らかなように, 後部のランニング・バンドの摩擦係数はどの場所でも前部に比べて大きい. このためストーンが回転しながら滑ると, 反時計方向の回転ならば左向き, 時計方向の回転ならば右方向の正味の摩擦力が生まれる. 正味の摩擦力はストーンの運動に対して外力として作用し, ストーンをカールさせる.

なお, Johnston (1981) が示唆したように, ランニング・バンドにかかるストーンの荷重が後部より前部で大きくなると考える場合は, 式 (9) に圧力の効果を加えて摩擦係数を求めることにより,

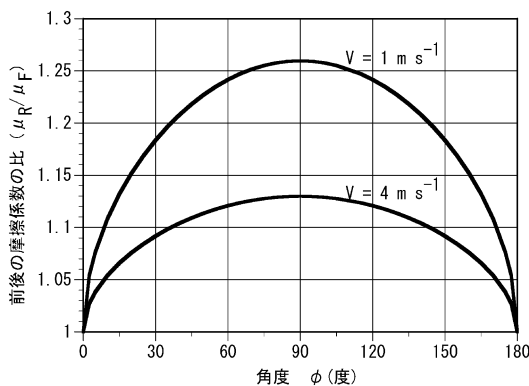


図 5 ランニング・バンドの 2 点の摩擦係数の比 ( $\mu_R/\mu_F$ ), 温度  $-4^\circ\text{C}$ , 相対湿度  $H = 100\%$ , 速度  $V = 1 \text{ m s}^{-1}$  と  $4 \text{ m s}^{-1}$  の場合. 式 (9) で計算.

その比 ( $F_R/F_F$ ) は次のようになる.

$$\frac{F_R}{F_F} = \frac{\mu_R p_R}{\mu_F p_F} = \left( 1 + 0.024 \frac{P_0 - P}{T_M - T_F} \sqrt{\frac{r \sin \phi}{V}} \right) \left( \frac{p_R}{p_F} \right)^{1+\alpha} \quad (10)$$

$p_R$  と  $p_F$  はそれぞれ R 点と F 点の圧力である (図 3).  $p_R/p_F$  の値はストーン重心の高さに依存し, 減速度とともに小さくなると予想されるが, 実際上見積もりは不可能に近い. しかし, 例えば  $p_R/p_F = 0.9$  というかなり極端な場合を考えても,  $(p_R/p_F)^{1+\alpha} = 0.93$  ( $\alpha = -0.33$ ) あるいは  $0.92$  ( $\alpha = -0.25$ ) となり, 式 (10) の値は式 (9) で計算した値より 7~8% 小さいに過ぎない.

ランニング・バンド後部の摩擦係数が前部のそれより大きくなる原因がもう一つある. それは, 第 2.2 節で触れたペブルに作用する大きな力の結果である. ペブルには  $0.4\text{--}8.1 \text{ MPa}$  (約  $4\text{--}80$  気圧) という大きな力がかかるから, ペブルは滑らかに摩擦されるだけでなく, 摩擦によって機械的に変形・破壊される. 前部のランニング・バンドの摩擦で生成した細かな氷屑は, 次の瞬間後部ランニング・バンドに接触し, 運動に影響を与える. 氷屑が後部の摩擦係数をどのように変えるか明らかではないが, 運動を妨げる摩擦力として作用すると考えられる. ただし, 作用は偶発的で予測は難しい.

前部ランニング・バンドの滑りに対しては, スウィーピングによってゴミや氷屑を除去することができるが, 後部ランニング・バンドが出会う氷屑は人為的には避けることができない氷屑である. しかし, その作用はストーンを正しい方向にカールさせる摩擦力として働くから, カーリングの最も本質的な摩擦力と考えるべきなのかもしれない.

### 5. まとめ

カーリング・ストーンがアイスシート上を滑るとき, 作用する外力は水の摩擦力のみとみなしてよいから, その運動は一見単純な物理演習問題に見える. しかし, 実際はなかなかの難問で, 氷の複雑な物性がいろいろな形で関係する. 本報告では, 氷の摩擦係数, ペブル, ランニング・バンド, スウィーピングに簡単に触れた後, ストーンがカー

ルするメカニズムとして提出されている幾つかのモデルを紹介した。最後に、新しいモデル「蒸発摩擦モデル」を紹介した。以下に結論をまとめる。

- 1) ペブルとランニング・バンドは、水物性を巧みに利用したカーリング競技の必須項目である。すなわち、二つの存在により、氷にかかる圧力が大きくなり、その結果、摩擦係数が減り、よく滑る。また、ストーンの回転とスウィーピングの効果がより強化され、更に、生成される水屑がストーンの運動に微妙な変化を与える。
- 2) カールを説明するために提出された「圧力差モデル」「水膜モデル」「雪かきモデル」「左右速度差モデル」等は、物理学的な不合理の他に、カールする距離(度合い)が回転の大小であまりかわらないことを説明できない。
- 3) 「蒸発摩擦モデル」の根拠は、蒸発による温度低下のためランニング・バンドの後部が前部に比べて摩擦係数が大きくなること、および摩擦による水屑発生のため後部の摩擦力が大きくなること、の2点である。「蒸発摩擦モデル」の要点を次の5項目にまとめた。
  - A) ペブルの「摩擦→蒸発→温度降下」により、後部ランニング・バンドの摩擦係数は前部より大きい。
  - B) 後部と前部の摩擦係数の差は、滑り速度、温度、湿度、ランニング・バンドの大きさによって決まる(式(9))。摩擦係数の差は、滑り速度が小さいほど、温度が高いほど、湿度が低いほど、またランニング・バンドの直径が大きいほど、大きい、すなわちカール距離が大きくなる。
  - C) 後部と前部の摩擦係数の差は、ストーンの回転速度と関係がない。すなわち、カール距離は回転数と無関係。
  - D) ペブルの「摩擦→水屑生成」により、後部ランニング・バンドの摩擦力は前部より大きい。そのためストーンは正しい方向にカールするが、水屑の生成と作用は偶発的なので予測は難しい。
  - E) ストーンの滑りやカール距離は、ランニング・バンドのサイズや粗度、ペブルのサイ

ズ、分布の状況、等によって変えることができる。

最後に、ペブル表面が摩擦によって昇温したあと蒸発で降温することを確かめる実験を試みた。実験は0.1 mmφのクロメル・アルメル熱電対を氷表面に埋め込んで行われたが、正確な測定は出来なかった。摩擦によって昇温する水層の厚さは10 μm以下のオーダーと考えられるので、氷表面にセンサーを埋め込んでの測定は原理的に不可能と考えられる。表面温度の直接測定ではなく、例えば光干渉法等の方法によって氷表面を間接的に測定する方法が将来行われることを期待する。

## 謝 辞

カーリングに関していろいろ教えていただいたソルトレイクシティ冬季オリンピックおよびトリノ冬季オリンピック・カーリング競技女子日本代表の小笠原(旧姓 小野寺)歩氏、日本カーリング協会の藤巻 正氏、土屋長雄氏、あさまハイランドスポーツクラブの小林貞雄氏、北海学園大学の小野 丘氏、前川製作所の小松 雄氏、北海道新聞社の宇佐美祐次氏に深く感謝の意を表します。

また、前後の圧力差を取入れた式(10)の導入を示唆して下さった雪氷編集の遠藤八十一氏と、カーリングに関する日本の報告書をご教示下さった匿名査読者に感謝します。

## 文 献

- Denny, M., 1998: Curling rock dynamics. *Can. J. Phys.*, **76**, 295-304.
- Denny, M., 1999: Reply to comment on: Curling rock dynamics-The motion of a curling rock : inertial vs. noninertial reference frame. *Can. J. Phys.*, **77**, 923-926.
- Denny, M., 2002: Curling rock dynamics: Towards a realistic model. *Can. J. Phys.*, **80**, 1005-1014.
- Evans, D.C.B., Nye, J.F. and Cheeseman, K.J., 1976: The kinetic friction of ice. *Proc. R. Soc. London*, **A 347**, 493-512.
- Jensen, E.T. and Shegelski, M.R.A., 2004: The motion of curling rocks: Experimental investigation and semi-phenomenological description. *Can. J. Phys.*, **82**, 791-809.
- Johnston, J.W., 1981: The dynamics of a curling stone. *Can. Aeronautics and Space J.*, **27** (2), 144-



- 161.
- 小林 宏, 1986: カーリング. 冷凍, **61** (710), 307-311.
- ルクウィッチ, E., フォーク, R., ゴウセル, P., 1985: ザ・カーリング (岩崎まさみ訳・小林宏監修), ぎょうせい, 118pp.
- 前野紀一, 2004: 新版 氷の科学. 北海道大学出版会, 234pp.
- 前野紀一, 2009: カーリング・ストーンがカールするメカニズム: 蒸発摩耗モデル. 雪氷研究大会 (2009・札幌) 講演要旨集, p. 219.
- Maeno, N., 2010: Curl mechanism of a curling stone on ice pebbles. Bulletin of Glaciological Research, **28**, 1-6.
- Maeno, N. and Arakawa, M., 2004: Adhesion shear theory of ice friction at low sliding velocities, combined with ice sintering. J. Applied Phys., **95** (1), 134-139.
- Maeno, N., Arakawa, M., Yasutome, A., Mizukami, N. and Kanazawa, S., 2003: Ice-ice friction measurements, and water lubrication and adhesion-shear mechanism. Can. J. Phys., **81**, 241-249.
- 益子正文, 1998: カーリング. トライボロジスト, **43** (1), 155-158.
- 小川豊和, 2006: みんなのカーリング—日本カーリング協会オフィシャルブック. 学習研究社.
- Oksanen, P. and Keinonen, J., 1982: The mechanism of friction of ice. Wear, **78**, 315-324.
- Penner, A.R., 2001: The physics of sliding cylinders and curling rocks. Am. J. Phys., **69** (3), 332-339.
- Petrenko, V.F. and Whitworth, R.W., 1999: Physics of Ice. Oxford University Press. 373pp.
- Shegelski, M.R.A., 2000: The motion of a curling rock: Analytical approach. Can. J. Phys., **78**, 857-864.
- Shegelski, M.R.A., Niebergall, R. and Walton, M.A., 1996: The motion of a curling rock. Can. J. Phys., **74**, 663-670.
- 高橋幸一・野々宮徹 (編), 1997: 雪と氷のスポーツ百科. 大修館書店, 210pp.
- 対馬勝年, 2009: スケート, スキー, カーリングのトライボロジー. トライボロジスト, **54** (7), 49-53.
- 安留 哲・荒川政彦・前野紀一, 1999: 氷・氷摩擦係数の測定. 雪氷, **61**, 437-443.

## Curling and physical properties of ice

Norikazu MAENO<sup>1)</sup>

*1) Professor Emeritus of Hokkaido University*

*Hanakawa Minami 7-2-133, Ishikari, Hokkaido 061-3207*

(2010年1月5日受付, 2010年2月26日改稿受付, 2010年3月11日最終改稿受付, 2010年3月11日受理)