

研究ノート

カーリング・ストーンの曲がりの説明について

対馬 勝年¹⁾

要 旨

雪氷 72 巻, 3 号の解説「カーリングと氷物性」はストーンがなぜ曲がるのかという興味ある問題を提起した。しかし, 解説には重要な論文の見落としがあり, 摩擦力を外力と見なした点や真の接触面の分布と見積もり, ストーンの方角を変える機構の考え方, ストーン後面の摩擦増大をもたらす機構などいくつかの問題があると思われ, トライボロジーの見地から補足を試みた。本報では Harrington の研究を紹介するとともに, ストーン底面のランニングバンドとペブルとの真の接触面の大きさ, 低速領域で速度が遅くなるほど曲がりが大きくなる理由, 自転の角速度の減衰が極めて小さい理由などを考察した。低速で摩擦が増大するという特性に着目することで, ストーンの曲がりにはストーンの左右の摩擦の異方性に起因するとする Harrington や Denny らの主張を支持する結果を示した。

キーワード: カーリング, カール, 摩擦の速度特性

Key words: curling, curl, velocity dependence of friction

1. はしがき

最新の前野 (2010) の解説はカーリング・ストーンのカーリング機構には諸説があり, 未だ決定的説明はないと指摘している。解説 (前野, 2010) ではストーンがカーブ (カール) する説明として, 進行方向に向かって ①「左右の摩擦の違い」に基づく学説と, ②「前後の摩擦の違い」に基づく二大学説があることを紹介し, ②の一つとして解説者考案の蒸発摩擦説が加わっている。

解説 (前野, 2010) はカールの説明の最初の試みを Johnston (1981) と断定しているが, Colbeck (1993) の文献集によると Harrington (1924) がカーリング・ストーン運動に関する論文を発表している。Harrington (1924) はストーンの軌跡, 摩擦の速度特性, 回転について総合的研究を行い, 低速領域で摩擦が増大するという速度特性に着目し, カールの機構をストーン左右の摩擦の異方性によるものとして説明している。

解説 (前野, 2010) はカールの原因として Johnston (1981), Shegelski (2000), Maeno (2010) らが

主張するストーン前後の摩擦の異方性 (後面の摩擦が前面より大きい) を支持している。その理由として滑走方向に直交する方向を x 軸とすると, 左右の摩擦の異方性は x 軸方向の摩擦成分の合力が 0 となるが, 前後の摩擦異方性は x 軸方向の摩擦力成分をもち, 摩擦力成分の方向にカールすると主張している。摩擦力を外力として扱い, 外力の方向にカールすると主張しているわけだが, これには二つの点で疑問がもたれる。まず, 摩擦の古典論 (凝着説) によると, 滑っている物体間の真の接触面に凝着や付着が形成される。主にその凝着や付着部を剪断破壊しながら物体は滑って (前進して) いる。運動を妨げる原因は凝着や付着であり, 摩擦力という外力が実在するわけではない。しかし, 仮想的な力としての摩擦力の導入は運動の解析に便利であり, 好んで使われてきた歴史がある。摩擦力は外力ではないが, 摩擦力は常に運動を妨げる方向に現れることになる。ストーン前後面の摩擦異方性起因説では接触リング面で x 軸方向の摩擦成分の合力方向にカールすると主張しているが, 上の摩擦機構から明らかなように摩擦力と正反対の方向に物体は運動しているはず

1) 富山大学理学部

である。反時計回りに自転しながら滑っているストーンで x 軸方向の摩擦成分の合力が負の向き (図 1) になったとすれば、解説 (前野, 2010) とは逆に x 軸の正の向きに運動していることを意味する。つまり Maeno (2010), 前野 (2010) らの主張したのとは逆方向にストーンはカールして行くことになり、実際のストーンのカールを説明できない。

力はベクトルなのだから、力を平行移動し合力で議論するのではなく、力の成分の分布が運動の方向を変えると解釈すべきであろう。一方、左右の摩擦異方性の場合、反時計方向の自転を伴う場合はストーンの左側の速度が遅くなり、摩擦は速度が速くなる右側より大きいから、摩擦の大きい左側を軸に右側が突出する形となり (左側に大きなブレーキがかかって遅くなり、右側が突出すると考えても同じ)、反時計方向にカーブしながら前進すると解釈される (対馬, 2009, 2010)。これと同じ説明を Denny (1998) はカヌーの櫂のひとかきが進行方向を曲げるように左右の摩擦 (厳密には速度) の違いがカールを生ずるのだと説明している。逆に、櫂によりブレーキをかけると、その櫂を軸にカヌーが曲がる。同じように、ストーンも摩擦の大きい方を軸に曲がると説明する方が判りやすい (図 2)。Denny (1999) はまた, Shegelski and Reid (1999) のコメントへの回答の中で双胴船模型を使ったカールの説明も行っている。左側の船の摩擦が大きく、右側の船の摩擦が小さければ、摩擦の小さい方が突出し、左側にカールする。注意深い観察者は自動車のスリップ、ボート、リヤカー、橇などを通して左右に摩擦の違いがあれば摩擦の大きい方が急減速し、あたかも摩擦の大きい側を軸に回転するように曲がることを学んでいるであろう。

前後の摩擦の異方性の場合、特に後部の摩擦が大きい場合には直進性が保たれやすい。逆に、前部の摩擦が大きい場合は運動が不安定で摩擦の小さい後部が半回転して、前後を入れ替えることがある。Johnston (1981), Shegelski (2000), 前野 (2010) らの後方の摩擦が大きいとする説は上の観点からはカールを起こしにくい条件下でのカールを主張していることになる。

① と ② のカール機構の違いをもう少し補足し

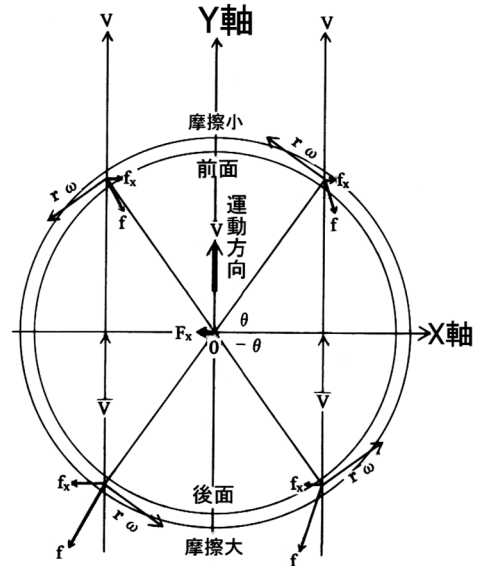


図 1 前後の摩擦の異方性に基づくカールの説明。後面の摩擦が前面より大きい。反時計回転の時、左側にカールする。X 軸方向の摩擦成分 F_x は負の向きとなる。

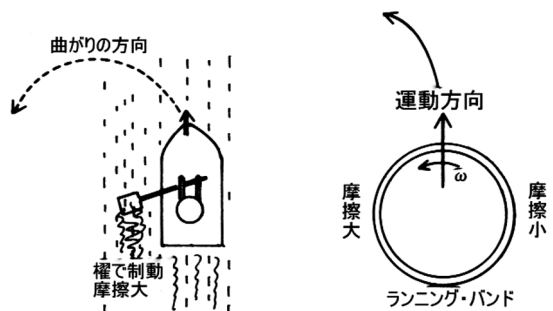


図 2 左右の摩擦の異方性に基づくカールの説明。摩擦の大きい方が回転軸となって左側にカールする。

よう。①では「自転」は左右の摩擦の違いを発生させるための必要条件であって、左右に摩擦の違いがあればその後のカールのために自転は関与しない。つまり片側だけをスウィープするなどして左右に摩擦の違いを発生させれば自転がなくてもカールする。一方、②の場合は、何らかの機構でストーンの前部の摩擦が小さくなるか、後部の摩擦が大きくなる必要がある。前部の摩擦が後部の摩擦より小さい場合に、自転の方向にカールする。この場合には自転なしにはカールは発生できない。ここでは、なぜ前部の摩擦が後部より小さくなるのか (あるいは後部がなぜ前部より摩擦が

大きくなるのか) が最大の問題となる。

そのほか、ストーンに加えられる弱い自転 (10 秒一回転程度) がなぜ終端近くまで持続しうなのか? 自転の初期角速度がカール距離に及ぼす影響が大変小さい理由はどこにあるのか? 最初は直線的に進み、終端近くでカールが発生するのはなぜか? カールしやすいアイスシートとカールしにくいアイスシートはどこが違うのか? などカーリングについては興味深い問題が多い。

本報では Harrington (1924) の業績を紹介するとともに、トライボロジーの見地からストーン底面とペブル (ペブルとは平らな氷のリンクにペブルガンで水滴を落として作られた粒々状の氷の突起であり、ペブル先端はニッパーと呼ばれる横幅 1 m もある大きなマイクロームのようなもので削って均一な高さに製氷される) との真の接触面の考察、摩擦の速度特性、自転に対する摩擦が極端に小さくなる理由、終端近くでカールが顕著になる理由、蒸発摩耗説への疑問などを述べる。

2. Harrington の研究

Harrington (1924) はストーン滑走中の経過時間とリンクの縦方向と横方向位置および自転の角度を同時測定して、ストーンの軌跡を描き、ストーンの終端近くでカールが生ずることを示した。ストーンの自転が終端近くまではほぼ一定の角速度を維持することも示している。別個に行った氷の回転円板上でのストーンの滑り摩擦の実験から低速度領域で速度の低下とともに摩擦が増大する結果を得ている。その結果に基づいて、速度の速い領域では速度による摩擦の違いがないからストーンは直線的に進むが、低速領域ではストーンの左右における $v \pm r\omega$ の速度差が摩擦の違いを生ずる (v は滑走速度, r は接触リングの平均半径, ω は自転の角速度)。速度の大きい側の摩擦が小さく、速度の小さい側の摩擦が大きくなり速度が遅いほどその差が大きくなることから、左右の摩擦の違いがカールをもたらすと論じている。

Harrington (1924) のストーンの軌跡に示された滑走停止時間 t と滑走距離 s から平均摩擦係数 μ を求めると 0.02~0.06 程度となり、今日のストーン (μ が 0.01 程度) に比べると摩擦は大きかったといえる。

3. 真の接触面の見積もり

ストーン底面のランニングバンド (幅 5 mm 程度, 直径 130 mm 程度の平らなリング) がペブル先端に 200 N の自重で接触し、真の接触面が形成される。Butkovich (1954) は直径 6.4 mm の圧子を荷重 27 N で氷に押し付けブリネル硬さを測定している。氷温 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$ では硬さが 50~100 MPa であった。これに対し解説 (前野, 2010) の 0.4~8.1 MPa は一桁から二桁小さく見積もられていて真の接触面の圧力としては小さすぎるであろう。接触面積で比較すると Butkovich (1954) の硬さは $2 \sim 4 \text{ mm}^2$ を与えるが、解説 (前野, 2010) は $25 \sim 500 \text{ mm}^2$ である。ストーンの場合は球面ではなく、平坦面であり、氷面の方が曲面状であるという違いを考慮しても真の接触面積が解説の値ほど大きくなるとは考えにくい。次に摩擦係数 0.01 程度から真の接触面の剪断強さ S を見積もると、Butkovich の値は氷の剪断強さと同程度の $S = 1 \text{ MPa}$ を与えるが、解説 (前野, 2010) は 0.004~0.08 MPa となりストーンと氷の付着強さや各種材料に対する氷の付着強さ 0.2~数 MPa 程度にくらべても小さすぎる。その原因は氷の硬さを小さく見積もりすぎたことによるのであり、ストーン底面と真実接触するペブルの個数についても 20~100 個との見積りは大きすぎと思われる、6~10 個内外 (各真の接触面の面積は 1 mm^2 以下) が妥当な数値であろう。これらの比較を表 1 にまとめて示した。このように真の接触をする個数が少なく、各真の接触面積も小さいことを考慮すると、ストーンの前面で接触したペブルの同じ真の接触面が再び後面にも真の接触を作ることとは考えにくい。したがって「蒸発摩耗説」の前提に疑問がもたれる。

表 1 ストーンとペブルの接触に関する諸特性の比較。

	P MPa	ΣA mm^2	A mm^2	N 個	S MPa
解説 (前野, 2010)	0.4 ~ 8.1	25 ~ 500	1 ~ 5	20 ~ 100	0.08 ~ 0.004
本報*	50 ~ 100	2 ~ 4	0.3 ~ 0.7	6 ~ 8	0.5 ~ 1

P : 真の接触面の圧力 (氷の硬さ), ΣA : 各瞬間の真の接触面の総和, N : 真の接触点の数, A : 一個当たりの接触面積, S : 付着強さ。動摩擦係数を 0.01 とした。氷の剪断強さは 1 MPa 程度。* Butkovich (1954) の硬度をもとに推定。

4. カーリング石の摩擦の速度特性と左右の摩擦の異方性

Harrington (1924) はペブルを持つ氷の回転円板上にストーンを滑らせて、低速度領域では速度の減少と共に摩擦が増大する結果を得た。しかし、得られた摩擦係数の値は $0.004 \sim 0.016$ であった。

対馬 (2010) はストーンの滑走停止距離 s と滑走停止時間 t の実測値から、初速度 v_0 と平均の摩擦係数 μ との関係を求めて、高速では $\mu = 0.01$ 程度の一定の摩擦係数を示すが、 $v_0 = 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 以下の低速度領域で摩擦係数が 0.03 程度まで増大する結果を得た。対馬 (2010) の速度特性図 3 は Harrington (1924) の実験結果と一致する。この速度特性をもとにストーンの左右端の摩擦係数のずれを示したのが図 4 である。ストーンが反時計回りの場合、後方から見て右端の速度が最大で $v + r\omega$ 、左端の速度が最小で $v - r\omega$ となる。速度が遅いほど摩擦係数の増大率が大きいから、低速になるほど摩擦係数のずれがより大きくなっている。

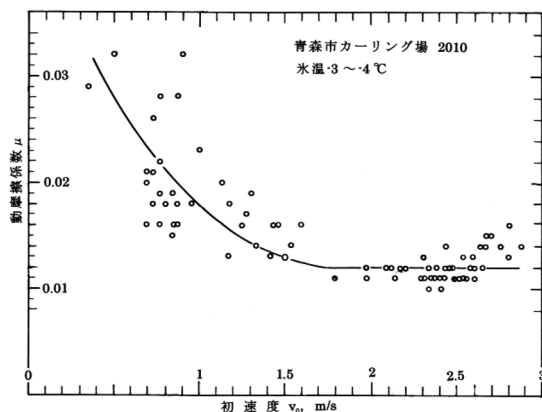


図 3 ストーンの摩擦の速度特性 (対馬, 2010)

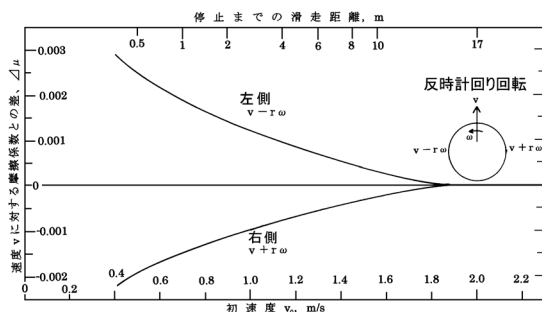


図 4 反時計回り (左回転) するストーンの左側と右側の摩擦の増減 (対馬, 2010)

る。x 軸の各値に対し y 軸方向の摩擦抵抗の成分は摩擦係数 f と y 軸に平行な等間隔の幅の面積素片に分割したときの面積 (図 6) との積に比例する。面積は左右の端の方にピークがあり、外径 65 mm 、幅 5 mm の接触リングの場合、中心から 45 mm までの面積と 45 mm から 65 mm までの面積がほぼ等しい。つまり、ストーンの左右の端の方により多く真の接触が現れやすいことを意味し、カールしやすい。

5. ストーンの自転に対する摩擦係数

ストーンは投入から停止までの 20 秒程度の間に $2 \sim 3$ 回程度のゆっくりとした自転を行う。Harrington (1924) は自転の角速度が終端近くまではほぼ一定値を維持し、角速度の減衰が極めて小さいことを示した。

ストーンの質量を m ($=20 \text{ kg}$)、ストーンを肉厚の円板と見なし、半径を R ($=0.15 \text{ m}$) とすると、ストーンの中心軸の周りの慣性モーメント I は

$$I = (1/2)mR^2 \quad (1)$$

なので、

$$I = 0.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2)$$

となる。

接触リングの半径を r ($=0.065 \text{ m}$)、自転の初期角速度を ω_0 ($=0.8 \text{ s}^{-1}$)、摩擦係数を μ ($=0.01$) とすると、単純な回転だけなら、

$$2\pi nmg\mu = (1/2)I\omega_0^2 \quad (3)$$

で示される n まで回転する。ただし、 g は重力加速度、 n は回転の割合である。数値を代入すると n はわずか 0.1 回転となる。しかし、並進運動に伴いながら自転する場合、実測では終端部を除くと回転速度はほとんど減衰がない。この理由を理解するために角度 θ 方向に当たる接触リング部のリングの接線方向の摩擦係数成分 μ_θ を求めた対馬 (2010) は、

$$\mu_\theta = (f_\theta/f)\mu$$

$$= \{r\omega/[v^2 + 2r\omega v \cdot \sin\theta + (r\omega)^2]\}^{1/2}\mu \quad (4)$$

の式を与えている。ただし、 f は角度 θ 方向にある接触リング部に働く摩擦成分、 f_θ の接線方向の成分が f_θ 、 v は石の y 軸方向の速度である。 $v = 1 \text{ m s}^{-1}$ 、 $r\omega = 0.05 \text{ m s}^{-1}$ 、 $\mu = 0.01$ とすると、 $\mu_\theta = 0.0005$ という極めて小さい値になることを導いて、自転は角速度をほとんど変えずに終端近くまで達することを説明した。

6. カールの大きさが初期自転速度にほとんど依存しないことについて

Shegelski (2000) や前野 (2010) は左右の摩擦異方性起因説ではカールの大きさが初期角速度に依存するはずであると疑問を投げかけている。この疑問の根底には自転の角速度がカールの大きさを決めるはずだという考えがあるように思われる。すでに本論では左右の摩擦異方性説の場合、自転は左右の摩擦の違いを引き起こす起源となるのであり、カールには直接の関係はないことを述べた。左右の摩擦の違いが左右の進行速度に違いをもたらす、それが原因となってカールを発生させていると説明した。Denny (1999) の双胴船模型で示されたように、例えば自転なしに投入された石の右半分に相当する部分だけをスウィープすれば、石は相対的に摩擦の大きくなる左端を軸にするように左側へカールしていくはずである。滑走中の進行速度は自転とは独立であると考えてよいから、左右の摩擦の異方性の程度がカールの大きさの違いを決めることになり、自転の角速度の依存性が小さいものと解釈される。

図 4 に示される左右の摩擦の増減は速度が小さいほど大きく、また自転の角速度が大きいほど大きくなる。しかし、図 5 に示すように自転により速度が大きくなる右側では、自転の角速度が大きいほどペブルとランニングバンド間の接触長も長くなり、増速による摩擦係数の減少と相殺して角速度が大きくなっても摩擦が変わらない。速度が小さくなる左側でも角速度の増大につれ接触長が短くなり、摩擦は変わらない。それらのためカールつまり曲がりの大きさが初期自転速度の影響を

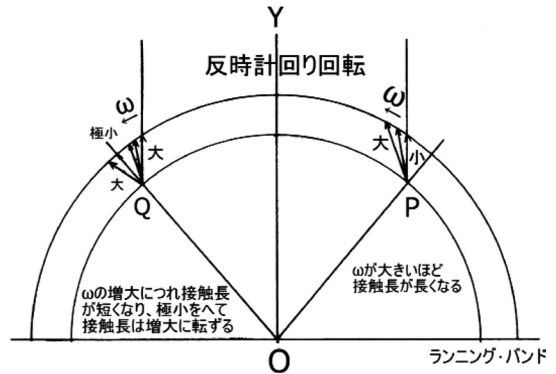


図 5 自転の角速度とペブルと接触リングとの接触長。

あまり受けないものと解釈される。ただし、自転速度が極端に速くなると左側では接触長が極小値を過ぎて長くなるように変化し、左右の摩擦の異方性が増大に転ずる。そのためカールを大きくする。これが Jensen and Shegelski (2004) の実験における 20 回以上の高速自転領域でのカール増大に対応するものと思われる。

7. カールしやすいリンクとカールしにくいリンク

ペブルの高さが全く同じ値ではないこと、石のランニングバンドにも歪みや粗さがあることから、石に真実接触するペブルの個数はアイスマークにより異なる。真の接触は微妙な高さの差によって変わるが、高さが不揃いの場合には真実接触するペブルの個数が少なく、高さが揃うほど真実接触するペブルの個数が増えるであろう。接触リングを 2 分割し、図 6 の挿入図のように前半分について考えよう。接触リングの内径を r_2 、外径を r_1 とし、 y 軸に平行に分割した素片の長さ δ を x の関数として表すと

$$\delta = [r_1^2 - x^2]^{1/2} - [r_2^2 - x^2]^{1/2}, \quad |x| \leq r_2 \quad (5a)$$

$$\delta = [r_1^2 - x^2]^{1/2}, \quad r_2 < |x| \leq r_1 \quad (5b)$$

となる。この δ を図 6 に示した。 δ は $\omega = 0$ のときのペブルがランニングバンドと接触する長さである。同図には $\omega = 2\pi \text{ s}^{-1}$ のときのペブルの接触長を点線で付記している。図からランニングバンドの端の方に面積の大きい部分がある。中心から離

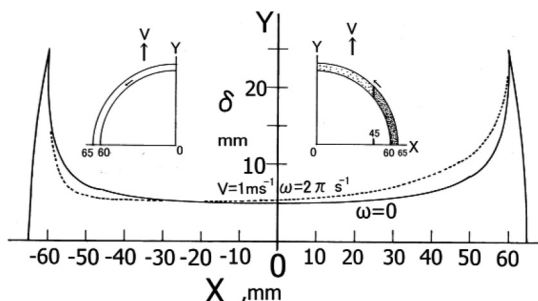


図 6 ストーンからの距離 x と接触リングの Y 軸方向の長さ δ (実線, $\omega=0$ のとき) および $V=1\text{ m s}^{-1}$, $\omega=2\pi\text{ s}^{-1}$ のときのペブルの接触長 (点線), 反時計回り回転.

れたところに面積の大きい部分があることはストーンの中心軸に対する回転モーメントを大きくする効果もある. いかにこの領域で真の接触をするペブルを作るかがアイスメークの目標となるであろう. カールは競技を面白くしているところであり, カールの大きいリンク作りはアイスメークの重要な要素となっている. 個々のペブルが大きく, ペブル間隔も広ければ摩擦の大きい端の部分が有効に活用されず, カールしにくいであろう. 高さの揃った小さなペブルが密に存在する方が真の接触面が多くなりカールしやすくなると考えられる. 一方, ペブルが大きくまばらで, 高さが揃っていない場合には真の接触をするペブルが少なくカールを生じにくいであろう.

8. ストーン前後の摩擦異方性説について

ストーン前後の摩擦異方性がカールの原因であるとする主張には二つの課題がある. ①前方の摩擦が後方の摩擦に比べ小さくなる理由の説明 (あるいは前方に比べ後方の摩擦が大きくなる理由の説明) と ②カールの機構の説明である.

②についてはすでに x 軸方向の摩擦成分では矛盾した説明になることを指摘した. ①については前野 (2010) が過去のいろいろな説明には不都合があることを指摘している. ①はカールを発生させるための必要条件の一つだから, この必要条件が満たされなければ前後の摩擦異方性起因説は成り立たないことになる. そこで, Maeno (2010) は蒸発摩擦説というアイデアを新たに提案した. この説によるとランニングバンドの前方が接触す

るペブルの温度より後方が接触するときのペブルの温度が低いと主張している. ここで温度とは接触リング直前にあってこれから接触 (真実接触のこと) しようとするペブルの表面温度のことである. ランニングバンド前面の直前にあるペブルの温度 (スウィーピングされていない場合はシート上のペブルの温度と同じ) がストーンの底面中央部の空洞 (カップ) を通過している間に自己冷却し, ランニングバンド後方に接触する直前にはシート上のペブルの温度より低くなっているという論理を考案したものである. これはペブルに何らかの作用を与えない限り起こりえないことである. そこで, 前野は前面で摩擦されることによりペブル表面に液膜が発生したり, 表面温度が上昇してカップ内の空間の空気との間に温度差が生ずることに着目した. 温度の高いペブル表面の飽和蒸気圧はカップ内の空気の蒸気圧より高いから, 昇華蒸発が発生し, 潜熱を奪われてペブル表面の温度が下がる. カップ内の空気が乾燥していればストーン外側のペブルの温度より低くなると主張した. いいかえると, あるペブルの表面を指で触れて微かに融かすと, その後の昇華蒸発により冷え, 周りの温度より低い温度まで下がってしまうという奇妙な主張をしているのと同じである. もう一つの問題として本論では真の接触面が小さいことに注目し, ランニングバンドの前面に接触したペブルの真の接触面が再び後面にも真の接触をする可能性はほとんど無く, 論理の前提そのものが成り立たないだろうことを注意した.

ストーン前面の摩擦が小さくなる場合がある. それはスウィーピングである. スウィーピングは全体重を加えた激しい摩擦であるから, ペブルの表面温度を上げ, 融解も起こるであろう. スウィーピングから解放されたペブルはストーンの接触リングと真の接触を形成する間の短い時間に冷え温度を下げるが, ランニングバンドの前面が接触する温度は後面が接触する温度より高く ①の条件を満たす. しかし, 一般にスウィーピングは直線的な滑走距離を伸ばし, カールを抑制する手法として用いられているようであり, 前後の摩擦異方性によるカール起源説に矛盾するように思われる.

9. まとめ

以上の結果をまとめると、

1. ストーンの曲がりの説明として Harrington (1924) の左右の摩擦異方性起源説を紹介した。
2. 接触リングに作用する摩擦力の x 方向 (運動方向を y 軸とし, y 軸に直交する方向) の成分 (合成成分) による説明はカールの方向が逆になり, 正しい説明とはならない。
3. 水のブリネル硬さの値からストーンとペブルの真の接触面積は $2 \sim 4 \text{ mm}^2$ 程度の小さい面積であると推測され, 真の接触点は 10 個内外であると推測された。
4. 低速度領域においてストーンの摩擦が増大するというストーンの摩擦特性を示した。
5. ストーンの自転に対する摩擦係数は 0.0005 程度と驚異的に小さく, ストーンは自転の角速度をほとんど減衰せずに終端に接近できることを示した。
6. 左右の速度の異方性が左右の摩擦の異方性を導き, 左右で滑走速度へのブレーキの大きさが異なることで, ストーンの左右の前進距離に違いを生じカールをもたらす。
7. カールの大きさが自転の角速度にほとんど依存しない理由として, 自転は左右の摩擦の違いを発生させるために必要なものであり, カールはストーンの前進と左右の前進速度の違いによって生ずることを述べた。
8. カールの前後摩擦異方性説にはなぜ前部にくらべ後部の摩擦が大きくなるのか, 後部の摩擦が大きくなることに対する説得力のある説明が不足している。

文 献

- Butkovich, T.R., 1954: Hardness of single ice crystals. SIPRE Research Paper, **9**, 1-12.
- Colbeck, S.C., 1993: Bibliography on snow and ice friction. CRREL Special Report, **93-6**, 1-17.
- 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 frames. Can. J. Phys., **77**, 923-926.
- Harrington, L.E., 1924: An experimental study of the motion of curling stones. Proc. Transactions Roy. Soc. Can., **18**, Sect. 3, 247-259.
- Jensen, E.T. and Shegelski, 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.
- Maeno, N., 2010: Curl mechanism of a curling stone on ice pebbles. Bulletin of Glaciological Research, **28**, 1-6.
- 前野紀一, 2010: カーリングと氷物性. 雪氷, **72**, 181-189.
- Shegelski, M.R.A., 2000: The motion of a curling rock: Analytical approach. Can. J. Phys. **78**, 857-864.
- Shegelski, M.R.A. and Reid, M., 1999: Comment on: Curling rock dynamics—The motion of a curling rock: inertial vs. noninertial reference frames. Can. J. Phys. **77**, 903-922.
- 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**, 470-475.
- 対馬勝年, 2010: カーリング競技の摩擦推定とカールの機構. 寒地技術論文・報告集, **26**, 422-427.

Explanation of the curving motion of curling stones

Katutosi TUSIMA¹⁾

*1) Faculty of Science, University of Toyama,
Gofuku 3190, Toyama 930-8555*

Abstract: The review on “Curling and physical properties of ice (in Seppyo, vol. 72, no. 3)” discussed an interesting phenomenon why stones curve. This paper provides some additional explanations on the characteristics of the motion of a curling stone from the view point of tribology. This work also supports the theory of left-right anisotropy which was suggested by Harrington as the mechanism of curving.

(2011 年 11 月 11 日受付, 2011 年 2 月 9 日改稿受付, 2011 年 3 月 7 日最終改稿受付,
2011 年 3 月 8 日受理, 討論期限 2011 年 11 月 15 日)