

カーリング・ストーンはなぜ曲がるか？ 新理論：エッジ・モデル

Why does a curling stone curl ? A new theory: Edge Model

前野 紀一 (北海道大学名誉教授)

Norikazu MAENO

1. はじめに

カーリングは、約 500 年前にスコットランドで生まれ、ヨーロッパ、カナダ、アメリカを経由して全世界に広まった。長い歴史の中で競技場、氷、用具、服装、規則、等は、多くの人たちによって、改良、洗練され、テクニックや戦術も高度の進歩を遂げている^{1), 2)}。一方、主役であるストーンの運動には幾つかの課題が未解決のまま残されている。その代表が「ストーンはなぜ真つすぐ滑らず、曲がって滑るのか？」である。本論文では、この課題に対する新しい理論「エッジ・モデル」を紹介する。モデルの詳細については別の報告を参照されたい³⁾。

2. カーリング・ストーンはなぜ曲がるか？

ストーンの速度は通常 1~5 m/s の範囲であるから空気抵抗は小さい。そのため、野球やテニスのボールのように、曲がることを左右の速度差による空気の圧力差で説明することはできない。しかし、氷は速度が大きいほど摩擦抵抗が小さい、つまり滑りやすい、という特性を考慮すれば、ストーンの場合も左右の速度差で摩擦抵抗の差が生じる。ただし、ストーン全体の摩擦抵抗を計算してみるとわかるように、横方向の力は互いに相殺し合っただけで消えてしまうので、ストーンを曲げる力は発生しない。進行方向の摩擦抵抗はストーンを減速させ、また左右差によるトルクはストーンを回転させるが、ストーンは回転するだけで、滑る向きは真つすぐのままである⁴⁾。

ストーンのこの不思議な運動に関して、1930 年代には当時の数学や物理の権威たちが、ストーンが曲がるのは底面のランニング・バンド後部の摩擦抵抗が前部より大きいという力学の結論を導き出している^{5), 6)}。これを受けた形でランニング・バンド後部の摩擦抵抗が前部より大きくなることを説明する物理モデルが幾つか発表された。ジョンストン⁷⁾の「圧力差モデル」、シェゲルスキーたち⁸⁾の「水膜モデル」、デニー⁹⁾の「雪かきモデル」、前野^{10), 11)}の「蒸発・摩擦モデル」、ナイベルクたち¹²⁾の「スクラッチ・ガイド・モデル」、シェゲルスキーとロゾウスキー^{13), 14)}の「ピボット・スライド・モデル」、等々である。しかし、いずれの理論モデルも完全ではなく、また実験による証明がほとんど行われていない^{4), 15), 16)}。

「ストーンはなぜ曲がるか？」という一見単純そうな課題が、カーリング発祥から 500 年経っても、またこの 100 年間の活発な理論研究にも関わらず解決していないのはなぜであろうか。カーリング研究の先駆者マッコウレーとスミス⁵⁾は 88 年前の論文の最後に「我々はなにかもっとも大事なことを見過ごしているのではないだろうか」と書いている。筆者も同様の感想を持ちながら研究を続けてきた一人であるが、今年になって今回のアイデアが頭に浮かんだ。本論文で提案する「エッジ・モデル」は、このアイデアをもとに生まれた新しい理論モデルである。

3. 新理論：エッジ・モデル

カーリング・ストーンの底は中央が窪んでおり，氷に接するのはランニング・バンドと呼ばれるドーナツ状の平面である．ランニング・バンドの直径は約 13 cm，幅は 3～10 mm，面積は約 20 cm² である．これまでストーンの運動に作用する抵抗はランニング・バンド平面に接する氷の摩擦抵抗が考えられてきたが，エッジ・モデルでは，この他にランニング・バンドのエッジによる抵抗を考える．エッジの効果を考慮するのは，ランニング・バンドの両端は，文字通り「端 (edge)」であるが，ストーンが氷表面を滑るとき，その角度あるいは鋭さによっては「刃 (edge, blade)」の働きをするからである¹⁷⁾．

これまでカーリングの世界では，「ランニング・バンド」「ランニング・サーフェイス」「ランニング・エッジ」等の呼び名がほぼ同じ意味で使われ，氷に実際に接触するのが「平面 (バンド，サーフェイス)」なのか「刃 (エッジ)」なのかはあまり意識されなかった．エッジ・モデルはこの点に着目したことになる．

図 1 のストーンの模式図から分かるように，ランニング・バンドの外側エッジと内側エッジの作用は異なる．ストーンが左に進むとき，氷表面の突起（ペブル）が最初に出会うのは，前面ランニング・バンドの外側エッジであり，後面ランニング・バンドは内側エッジで氷に出会う．外側エッジの角度 (θ_{OUT}) と内側エッジの角度 (θ_{IN}) が異なれば，エッジ効果も異なるであろう．

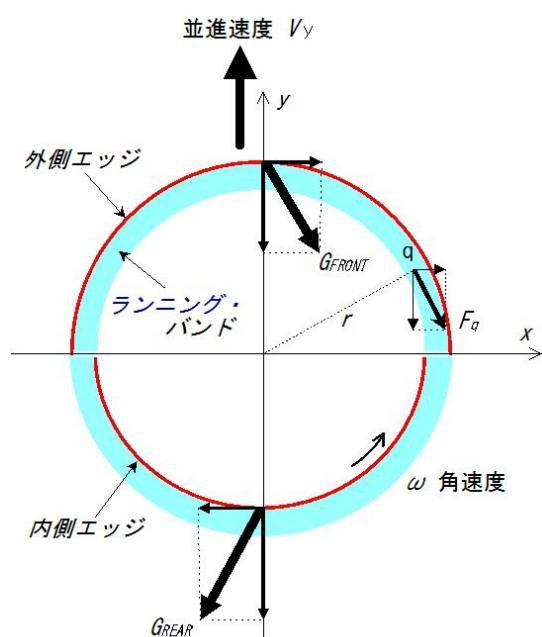


図 2 外側エッジと内側エッジによる抵抗

ペブルならマイクロな衝突をし，続いて塑性変形，破壊，あるいは切削が起こるであろう．

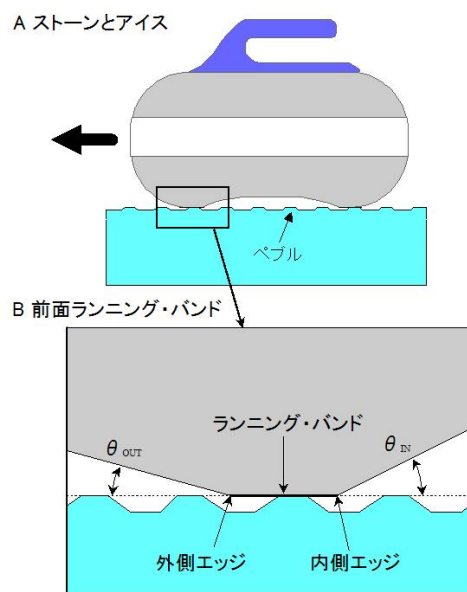


図 1 ストーンとランニング・バンドの模式図

図 2 でストーンは反時計回りの回転をしながら上方に進んでいるとする．エッジ効果を強調するため，前面ランニング・バンドの外側エッジと後面ランニング・バンドの内側エッジは赤太線で描いてある．ランニング・バンドがペブルから受ける抵抗は通常の平面摩擦による抵抗 (F) とエッジによる抵抗 (G) の和であるが， F はペブル表面の摩擦係数を与えることにより容易に算出することができる^{10), 11)}． G は前面ランニング・バンドが受ける抵抗 (G_{FRONT}) と後面ランニング・バンドの受ける抵抗 (G_{REAR}) の和である．

$$G = G_{FRONT} + G_{REAR} \quad (1)$$

そのときエッジが受ける抵抗は、金属やプラスチックの研削・切削工学の結果から次のように表現される³⁾。

$$G = G_0 e^{C\theta} \quad (2)$$

ここで、 G_0 と C はプラスの定数、 θ はエッジ角である。式(2)によれば、エッジによる抵抗はエッジ角の増加とともに指数関数で増える。

実際の競技に使われるストーンのランニング・バンドの形状は、製造上あるいは操作上の機密のためか一般には公表されていない。しかし、ランニング・バンドの幅と直径は容易に計測できる。エッジ角は小さいので特殊な測定器がなければ計測できないが、いくつかのストーンについて計測してみると、内側エッジ角は外側エッジ角より大きい、すなわち $\theta_{IN} > \theta_{OUT}$ である。式(2)によればこの結果は

$$G_{REAR} > G_{FRONT} \quad (3)$$

を意味する。図2で明らかなように、ストーンの進行方向に対して G の横方向成分の向きは逆である。つまり、前面ランニング・バンドより後面ランニング・バンドの横方向成分が大きく、図2の場合向きは $-X$ 方向で、ストーンは左へカールする。

4. エッジ・モデルの検証実験

エッジ・モデルの簡単な検証実験を、底部をランニング・バンドの形状に加工したアルミニウ



図3 模擬ランニング・バンド

ムのシリンダー(外径 90 mm, 内径 70 mm, 高さ 100 mm)で行った。模擬ランニング・バンドの幅は 2 mm, 直径は 80 mm である。シリンダーAは外側エッジ角 $\theta_{OUT} = 2.8^\circ$, 内側エッジ角 $\theta_{IN} = 14.3^\circ$ で、シリンダーBは外側エッジ角 $\theta_{OUT} = 14.3^\circ$, 内側エッジ角 $\theta_{OUT} = 2.8^\circ$ である(図3)。



図4 模擬ストーン
(シリンダーB)

実験ではシリンダー上部に金属円盤を固定し、底のランニング・バンドに働く圧力が 110 kPa になるよう調整した(図4)。実際のカーリング・ストーンのランニング・バンドに働く圧力は約 100 kPa である。検証実験は札幌市の「どうぎんカーリング・スタジアム」のCレーン(氷温 -3°C)で行われた。模擬ストーンは、オリンピック出場経験のあるカーラーによってハウス付近で停止するよう Hog・ラインからデリバリーされた。初速およそ 2 m/s, 総回転数 3~4 回のデリバリーを数回行った結果、模擬ストーンAは、通常のカーリング・ストーンと同様に、時計回りなら右方向へ、反時計回りなら左方向へ曲がることが確認された。一方、模擬ストーンBは逆で、時計回りなら左方向へ、反時計回りなら右方向へ曲がることが確認さ

れた．模擬ストーン A は $\theta_{IN} > \theta_{OUT}$ ，模擬ストーン B は $\theta_{IN} < \theta_{OUT}$ であるから，この結果は，エッジ・モデルの予測と一致する．

5. まとめ

ストーンをカールさせる力がランニング・バンドの外側エッジと内側エッジの角度差によって生まれることを示すエッジ・モデルが提案され，簡単な実験で検証された．将来エッジ効果を加味した理論モデルが構築され，実際のストーンのエッジ角およびエッジの鋭さの関数として検証されることが期待される．

【参考・引用文献】

- 1) World Curling Federation, 2017: The Rules of Curling and Rules of Competition. World Curling Federation, 1-66.
- 2) 小川豊和 (監修), 新みんなのカーリング 公益社団法人日本カーリング協会オフィシャルブック. 学研教育出版, 2014, 131pp.
- 3) Maeno, N., 2018: Edge model of the motion of a curling stone. 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018 報告書.
- 4) 前野紀一, 2010: カーリングと氷物性. 雪氷, **72**(3), 181-189.
- 5) Macaulay, W.H. and Smith, G.E., 1930: Curling. *Nature*, **125** (3150), 408-409.
- 6) Walker, G., 1937: Mechanics of sport. *Nature*, **140** (3544), 567-568.
- 7) Johnston, J.W., 1981: The dynamics of a curling stone. *Can. Aeronautics and Space J.*, **27** (2), 144-161.
- 8) Shegelski, M.R.A. *et al.*, 1996: The motion of a curling rock. *Can. J. Phys.*, **74**, 663-670.
- 9) Denny, M., 2002: Curling rock dynamics: Towards a realistic model. *Can. J. Phys.*, **80**, 1005-1014.
- 10) Maeno, N., 2010: Curl mechanism of a curling stone on ice pebbles. *Bulletin of Glaciological Research*, **28**, 1-6.
- 11) Maeno, N., 2014: Dynamics and curl ratio of a curling stone. *Sports Eng.*, **17**, 33-41.
- 12) Nyberg, H. *et al.*, 2013: The asymmetrical friction mechanism that puts the curl in the curling stone. *Wear*, **301**, 583-589.
- 13) Shegelski, M.R.A. and Lozowski, E., 2016: Pivot-slide model of the motion of a curling rock. *Can. J. Phys.* **94**: 1305-1309.
- 14) Shegelski, M.R.A. and Lozowski, E. , 2018: First principles pivot-slide model of the motion of a curling rock: Qualitative and quantitative predictions. *Cold Regions Sci. Tech.*, **146**, 182-186.
- 15) Maeno N., 2015: Curling. *The Engineering Approach to Winter Sports*. Braghin F. *et al.* (eds), Springer-Verlag, New York, 327-347. DOI 10.1007/978-1-4939-3020-3_10
- 16) Maeno, N., 2016: Assignments and progress of curling stone dynamics. *Proc IMechE Part P: J Sports Engineering and Technology*, 1-6.
- 17) 前野紀一, 2018: 氷の切削メカニズムとカーリング・ストーン運動のエッジ・モデル. 日本雪氷学会雪氷研究大会 (2018・札幌) 報告書.