

## 討 論

# カールに関するコメント（成瀬，2012）への回答

対馬 勝年<sup>1</sup>

雪氷74巻2号のコメント（成瀬，2012）は左右の摩擦異方性からはカールを生じないという主張を支持する人達に共通した意見かと思うので，問題点を整理したい。

### 1. コメントはストーンが摩擦力（合力）の方向にカールすることになり，摩擦現象に矛盾

コメントで挙げているカールを説明する前野（2010a）の図3，前野（2010b）の図2（コメントに引用された根本らの図1はこの図2の転載）は摩擦力の分布を示し，ストーンは摩擦力の合力の方向にカールすると述べている。これは摩擦力は運動を妨げる方向に働くという摩擦現象に矛盾する。前後摩擦異方性説を説明する図上ではカールの方向と摩擦力のX軸方向の成分の合力方向が一致したことから，摩擦力の方向にストーンが動くという主張である。ストーンは外力の方向にずれる（カールする）はずである。実際のずれの方向と摩擦力の方向が一致したことから，摩擦力=外力との結論を導いた。それに対し，対馬（2011）は摩擦は常に運動を妨げる（運動と正反対）方向に作用するのだから，前野（2010a）の主張とは反対に，摩擦力と正反対の方向にストーンが動いているという結論になり，実際のカールの方向と矛盾することを指摘した。コメント（成瀬，2012）はこの矛盾やベクトル量である摩擦力の方向に関心を示していないように思う。対馬（2011a,b）は外力である摩擦力の方向に物体が移動するという論理が生まれるのを防ぐため，摩擦発生の起源に基づいて摩擦力は外力でないと強調した。

### 2. 左右摩擦異方性はカールを生じないとするコメントで見逃された拘束力

ストーンのリング状底面とアイスシートの間働く力はコメント（成瀬，2012）や前野（2010a, b）が取り上げた摩擦力だけではない。その他に運動に伴って「拘束力」が働くことが見逃されている。このような物理学に入る以前の現象に対する洞察の段階で見逃しがあるためにコメントのような「論理的とは言い難い」とか「物理学の常識から離れた主張」，「掲載以前の問題」といった過激な感想になったのだと思う。

コメント（成瀬，2012）は摩擦力の左右の違いはストーンをスピンさせるが，重心の運動をカールさせることはできないとする前野（2010a）の主張を支持しているように思う。その根拠として上に述べた図3，図2の手法によると，左右摩擦異方性の場合には横方向の摩擦成分がお互い相殺されて0になるからだとしている。それに対し補足（対馬，2011b）はストーンの左右間の距離が固定されているために，スピンは必然的にX軸方向の動きを伴わなければならないことに着目している。コメントや左右の摩擦異方性説に反対する主張にはこの着目点が見逃されていることを繰り返して述べたい。

もし左右端間，前後端間が拘束されていない（フリー）だとすれば，左右端に摩擦の違いがあれば，運動とともに左右端間の距離と傾きが増していく。同様に前後に摩擦の異方性（前小，後大）があれば，運動とともに前後端の距離が広がっていく。ストーンのカールは多体問題の一種で左右端，前後端が一定の距離に固定されているために，左右間あるいは前後間に拘束力が発生する。補足（対馬，2011b，詳しくは対馬，2011c）の「カールする説明の試み」はそのことを2段階に分けて記述した。スピンするだけでカールしない

<sup>1</sup> 富山大学理学部

〒930-8555 富山市五福 3190

とする主張は前段だけを考えている。コメントでは後段のリングが伸び縮みできないことを指摘しながら、そのために発生する拘束力が X 軸方向の移動を生ずることが理解されていないと思う。この見逃しがあるためにとても受け入れられる説明でないと思われたのだと推測する。補足(対馬, 2011b)はスピンだけを生ずると主張する意見に配慮して、見落とされている左右間の拘束力によって X 軸方向の運動が生ずることを説明している。適切な例でないかも知れないが、振り子の最下端では水平方向の速度(運動)しかないのに、振り子は方向を変え弧を描く運動をする。これは糸を介しての拘束力が存在するためである。つまり、接線方向の速度成分しなくても、拘束力があれば方向を変え得ることが理解されていないのだと思う。

### 3. 左右の摩擦異方性だけでもストーンはカールする

氷上を滑るストーンの左右の摩擦の異方性は左右の速度差(速度が遅いほど摩擦大)や温度差(氷温が高いほど摩擦小)などによって発生する。速度差はストーンの自転によってもたらされるが、氷温が高いほど摩擦が小さくなることに着目すると温度差による左右の摩擦異方性も実現できる。これに関してはルクウィッチらの著書(1985)に「コーナースウィーピング」の説明があり、ストーンの片側だけをスウィープすることによりストーンのカールを調整できることが記されている。つまりストーンの左端に相当する氷の部分(例えば左側)だけをスウィープすると左端の部分だけ氷温が上昇しストーンと氷間の摩擦が減少して、スウィープと反対側にカールすることが記述されている。この場合、ストーンは滑走中の自転がなくてもよく、左右の摩擦異方性だけでカールが生じているわけである。

ストーンの両端だけを考えた場合、例えば、左側に摩擦の著しく大きいゴム片、右側に摩擦の小さいテフロン片を滑走面に貼り付けて、両者を棒でつなぎ、斜面上におけば、左側は動かず右側だけが滑って重心はゴム片の置かれた方向に移動していく。このように重心が横方向(摩擦の大きいゴム片の方向)に移動するのは両者が一定の距離

に固定されているため、両者間に拘束力が現れるからである。

摩擦力に関する問題に関しては水平面上にストーンを置いたときの静止摩擦力の方向について考えると、力の方向を指定できないことに迷ってしまう。力はベクトルだから方向があるはずだが、静止摩擦力の方向を指定できない。そんな力があるのだろうか。また板を傾けていったとき、滑り出すまでは重力の斜面下方向の力の成分が増すから、それにみあうように静止摩擦力が増えていくと考える。そんな変動する力が実在するのだろうかとも疑問に思う。運動中にも摩擦力が働くとすると、運動方向が変わる毎に摩擦力も方向を変える、そんな外力が存在するのだろうかとも疑問に思う。摩擦面では単に付着や凝着が存在するだけで、それが運動にブレーキをかけているに過ぎないとする方がわかりやすい。補足(対馬, 2011b)の繰り返しになるが、付着や凝着が摩擦力と呼ばれているものの本質だと思う。

### 4. おわりに

左右摩擦異方性説に疑問を持たれる読者のために今日の競技では禁止されているコーナースウィーピングによるカールコントロール法を付け加えた。補足では運動に伴って発生する左右間のずれを修正する方法でカールを説明したが、コメントを受けてそれを拘束力(摩擦の小さい側が摩擦の大きい側に引かれる拘束力は大きく、摩擦の大きい側が摩擦の小さい側に引かれる拘束力は小さい)と表現する方が理解を助けることに気付いた。読者にはもっとスマートな説明法を探究していただきたい。コメント(成瀬, 2012)には過激な表現もあり、驚嘆させられるのであるが、科学といえども議論の渦中にある完璧は期しがたいものである。回答では触れなかったが摩擦現象と摩擦力の問題はしかるべきところで真剣に検討されることを期待したい。

## 文 献

- エド・ルクウィッチ, リック・フォーク, ポール・ゴウセル, 1985: ザ・カーリングブック. 岩崎さきみ訳 75-76 頁, (株)ぎょうせい  
前野紀一, 2010a: カーリングと物性, 雪氷, 72, 181-

189.

前野紀一, 2010b: カーリングのサイエンス. 寒地技術論文・報告集, **26**, 418-421.

成瀬廉二, 2012: 「左右摩擦異方性がカールをもたらす仕組みおよび摩擦と摩擦力についての補足」へのコメント. 雪氷, 74, 171-172.

対馬勝年, 2011a: カーリング・ストーンの曲がりの説

明について. 雪氷, **73**, 165-172.

対馬勝年, 2011b: 左右摩擦異方性がカールをもたらす仕組みおよび摩擦と摩擦力についての補足. 雪氷, **73**, 405-407.

対馬勝年, 2011c: カーリング・ストーンの曲がりの一考察. 寒地技術論文・報告集, **27**, 415-420.

## Reply to “comments on curl” by R. Naruse

Katsutoshi TUSIMA<sup>1</sup>

*1 University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555*

(2012年4月19日受付)