

変則カーリング

木村 龍治*

1. はじめに

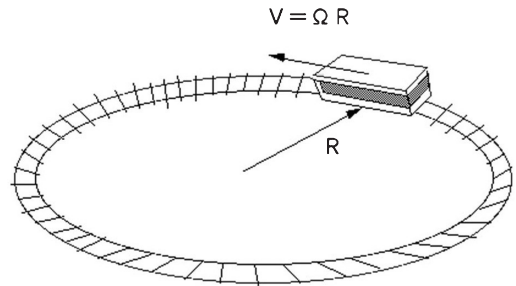
カーリングは、冬季オリンピックをきっかけに広く知られるようになった。ストーンと呼ばれる重さ20 kgの石の円板を氷上のリンクに滑らせて、相手のストーンにぶつけるゲームである。ストーンと床との間の摩擦が小さいので、ストーンを押し出すと、慣性によって前進する。その際、ストーンにわずかな回転を与えるので、カーリング (curling) という。今回は、このゲームから連想した思考実験について述べてみたい。

ストーンのリンクは、長さ約40m、幅約5mである。それを多少縮小して、リンクを電車に乗せることを考える。すなわち、電車の床が氷でできているわけである。しかも、この電車は環状線で、第1図に示すように、反時計まわりに一定の角速度 Ω で回転している。

もしも、線路が平面に敷設されていたとしたら、カーリングはできない。ハウスに入ったストーンは静止しなければならないが、線路が平面であれば、ストーンに遠心力が働いて、外側に滑ってしまうからである。それを避けるためには、第2図のように、線路を傾けておけばよい。

実は、これだけでは十分ではない。電車の床の中央にストーンを置くことを考えてみよう。ストーンは床の中央にいるときは静止しているが、少しでも環状線の外側方向に動けば、遠心力が大きくなって、ストーンは自然に外側に動く。ストーンが内側に動けば、遠心力が少なくなって、床の斜面を滑り落ちてしまう。斜めの床は不安定なのである。

それを避けるために、氷の表面を平面にしないで、多少たわみをつけ、どの場所でも、遠心力と重力の合力が、床に垂直になるようにする必要がある (地球科学の用語でいえば、床面をジオイド面にする)。そうすれば、どの場所でも、ストーンが静止できる。このような設定で、電車内のリンクで、手から放たれたス



第1図 電車が半径 R の円を描いて、等速円運動をしている。電車の速度は、 $V = \Omega R$ で与えられる。 Ω は電車の角速度である。



第2図 線路の傾き。重力と遠心力の合力が線路の面に垂直になるように、線路を傾ける。

* Ryuji KIMURA, 放送大学。

© 2012 日本気象学会

ストーンがどのような運動をするのか考察してみよう。

2. ストーンの運動

手を離れた直後のストーン
の運動を真上から観察し
てみよう。恐らく、スト
ーンは慣性で直進するが、電
車の方向が変化するため

に、次第に、電車の進行方向に向かって、右側にずれていくことが想像される。その様子を駒撮り撮影すれば、第3図のようなものではないだろうか。

この図は、ストーン
の軌跡を電車に固定した座標系
から見たら、ストーンが時計まわりに円運動していることを示している（もちろん、電車の側壁に衝突しないように、押す力を加減する必要がある）。あたかも、第4図に示したように、紐をつけたストーンが（平面の氷上を）時計まわりに回転している状態と似ている。

紐には中心向きの力 F がかかることに注意しよう。この力を求心力という。求心力は外向きの遠心力と釣り合っている。電車中のストーンには、紐はないが、求心力に当たる力 F が、ストーン
の進行方向に向かって右側にかかっていると考えざるをえない。そうでなければ、円運動にならないからである。すなわち、ストーン
の回転角速度を ω とすれば、

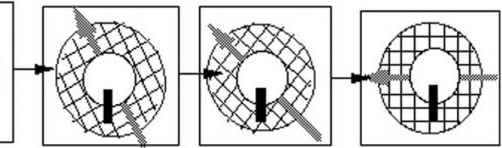
$$\frac{mV^2}{r} = F \quad \therefore mV\omega = F \tag{1}$$

の関係がなりたつ。それでは、 ω はどのようにして決まるのであろうか。

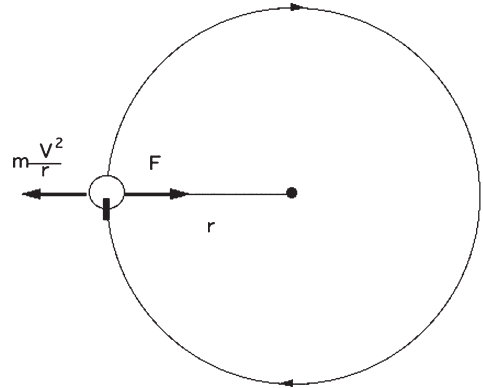
3. ストーンの運動のモデル化

電車内で静止しているストーンは、第5図に示すように、長さ L の紐にストーンをぶら下げた振り子と似ている。但し、振り子は角速度 Ω で反時計まわりに回転している。その回転半径が、線路の半径 R に対応している。また、ストーン
の傾きと線路の傾きが対応している。角速度 Ω で回転する座標系（電車に固定した座標系）から見れば、ストーンは静止している。

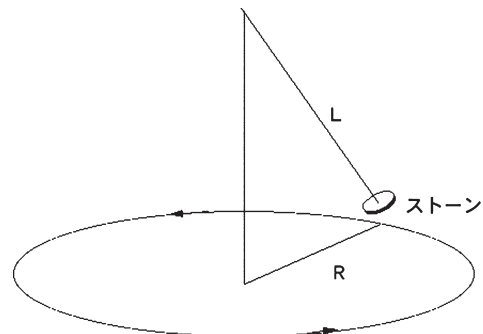
もしも、（電車内から見て）静止しているストーンをカーリングのように手で押して離せば、ストーンは振り子になって振動するだろう。その周期 T は、振り子の力学によって



第3図 紙面上向きに運動するストーンを、ストーンに固定した視点から見た図。影の矢印は電車の進行方向。基盤目は電車の床に描かれた模様。ストーンが1/4周するまでの時間経過を示している。



第4図 紐をつけたストーンが平らな氷の上で時計回りに回転している様子。回転半径を r 、ストーン
の質量を m 、周速度を V とする。外向きの遠心力と内向きの求心力が釣り合っている。



第5図 ストーンの運動を振り子でモデル化する。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g^*}} \tag{2}$$

で与えられる。ここで、 g^* は重力と遠心力の合力である。一方、紐の傾きの関係から、

$$\frac{L}{R} = \frac{g^*}{\Omega^2 R} \quad (3)$$

が成り立つ (第2図参照). この式を(2)式に代入すれば,

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} \quad (4)$$

であることが分かる. 振り子の周期は, 電車が1周する周期に等しい. すなわち, ストーンは, 時計まわりに角速度 Ω で回転する. しかし, この角速度は, 慣性系から見た角速度である. 電車は, 振り子が時計まわりに1周する間に, 反時計まわりに環状線を1周する. そのため, 電車の中からストーンが回転する様子を観察すると, 電車が1周する時間に, ストーンは時計まわりに2回, 回転する. すなわち,

$$\omega = 2\Omega \quad (5)$$

である. この関係を(1)式に代入すると,

$$F = 2m\Omega V \quad (6)$$

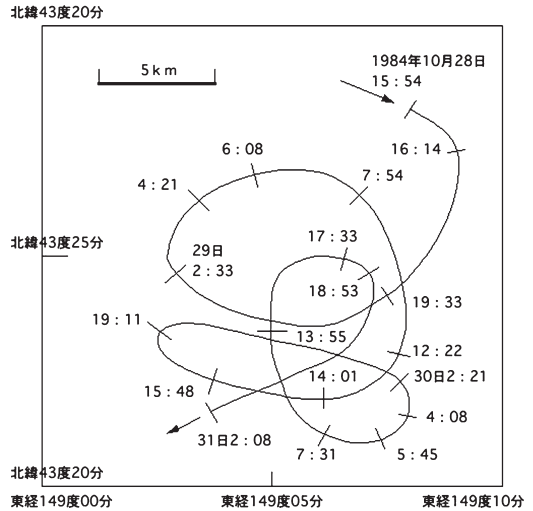
であることが分かる. 反時計まわりに回転する電車の中では, 速度 V で動く物体には, 進行方向右向きに, (6)式で与えられる力が働く. この力をコリオリ (Coriolis) の力という. あたかも, 求心力のような力なのである. 気象学では, 2Ω の部分をコリオリ・パラメーターということがある. また, 回転系で物体が慣性で動くときに描く円を慣性円という.

4. 慣性円

地球は球面なので, 地面の (鉛直軸のまわりの) 回転は緯度によって変化する (木村 2012). 緯度 ϕ の地面の回転は, $\Omega \sin\phi$ で与えられる. Ω は, 地球の自転角速度である. コリオリ・パラメーターは,

$$f = 2\Omega \sin\phi \quad (7)$$

のようになる. それでは, 緯度 ϕ にある空気は, 角速度 f で, 慣性円を描くことはあるのだろうか. 大気の場合, 常に, 気圧傾度力や摩擦力が働いているので, コリオリの力だけで空気が動くということはない. ところが, 海洋では, 慣性円がしばしば観測される. 静かな海に, 前線や台風に伴う強風が吹いて, 海水が水平方向に押されると, その後, 慣性円が発生して, 1ヶ月ほど持続する. 第6図にその一例を示す.



第6図 漂流ブイの軌跡 (東海区水産研究所の観測による).

北海道の東海上に投入された漂流ブイ (人工衛星によって位置を検出するブイ) の軌跡である. 時計まわりに回転しながら, 海上を漂っている. この周期を慣性周期という. その周期を求めると, 約17.5時間である. 観測海域の緯度は北緯43度なので, 海面は, 鉛直軸のまわりに, $24\text{時間}/\sin 43^\circ = 35\text{時間}$ の周期で回転している. ブイはその半分の周期で回転していることを示している. まさに, 変則カーリングのストーンの運動が, 海水によって再現されているのである. ストーンならぬ海水を押し出すのは風である.

5. 変則カーリングで学んだこと

- 1) 角速度 Ω で反時計まわりに回転する座標系から速度 V で運動する質量 m の物体を見ると, 進行方向に向かって右側に $F = 2m\Omega V$ の力が働いているように見える. この力をコリオリの力という.
- 2) 物体にコリオリの力だけしか働かない場合は, 物体は, 速度 V で, 時計まわりに回転する. 回転の角速度は 2Ω である. 物体が描く円を慣性円, 周期を慣性周期という.
- 3) 地球の場合, 慣性円の角速度は, コリオリ・パラメーター $f = 2\Omega \sin\phi$ である. 但し, Ω は地球の自転角速度, ϕ は緯度である.

参考文献

木村龍治, 2012: オイラーの円板. 天気, 59, 59-61.