

討 論

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

対馬 勝年¹⁾

雪氷 73 巻 3 号の研究ノート (対馬, 2011) に対し左右摩擦異方性説ではストーンのカールは生じないのでないかという質問があった。また摩擦と摩擦力の違いが理解しにくいとの質問を受けた。横山宏太郎前編集員委員長からそれらについての説明が有益とのコメントをいただいたので以下に大ざっぱではあるが補足説明を加えたい。

1. 左右摩擦異方性がカールを生ずる仕組み

反時計回りに緩く自転して Y 軸方向に滑っているストーンを考えよう。ストーンは底の幅が 5 mm, 直径 0.13 m ほどの平坦な接触リングがペブルの上を滑っていく。進行方向に向かって右側は自転の影響で増速, 左側は逆に減速となる。速度が遅いとペブルとリングの接触時間 (負荷時間) t が増し真の接触面が増えるので, 摩擦が大きくなる。その結果, 減速側の摩擦係数が増し ($\bar{\mu} + \Delta\mu$), 加速側の摩擦係数が減少 ($\bar{\mu} - \Delta\mu$) する。以下, リングの接触面積が最も大きく, 摩擦係数

が最大・最小となる左右両端だけを考える。左右両端が直径 $2r$ に相当する棒でつながれているとする。ただし, 棒はペブルから離れている。

仮に棒が自由に伸び縮みできるとすると, t 時間の間に摩擦の大きい左側 P は P'_v まで進み, 摩擦の小さい右側 Q は Q'_v まで進んで, 棒は傾くが, 棒の中心は Y 軸上にあるのでカールを生じない (図 1)。しかし, 接触リングの直径は伸び縮み出来ないから, 棒も $2r$ の長さを維持しなければならない。図 1 に示すように P'_v, Q'_v はそれぞれ S_a, S_b だけ滑って, 長さが $2r$ になるように P'', Q'' に移動する。摩擦の大きい P' は滑りにくく, 逆に摩擦の小さい Q' は滑りやすいから, 棒の中心は P'P'' 側に移動する。つまり, PQ の長さが固定されているために, 実際の滑りは PP'', QQ'' のようになり, 中心が摩擦の大きい側にずれてカールを生ずる。

次に, カールに及ぼす速度効果と自転の角速度の効果とを補足しよう。

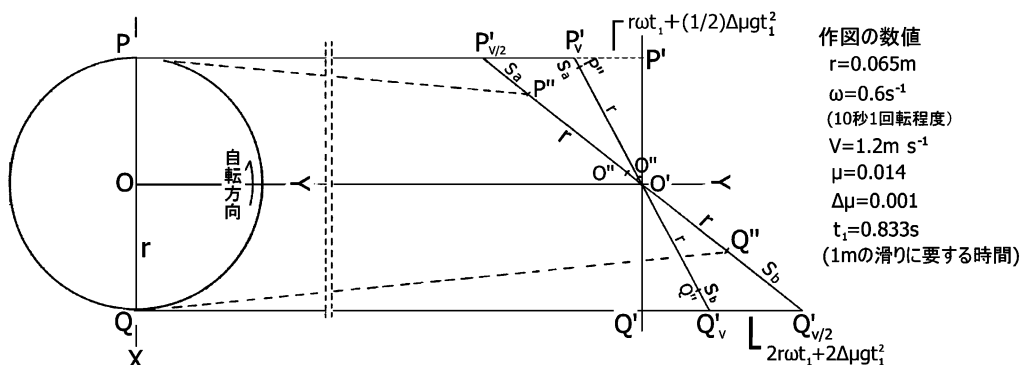


図 1 左右摩擦異方性のときのカール (速度効果)

1) 富山大学理学部

1.1 速度効果

速度 V が V_0 の場合と半分の $V = V_0/2$ の場合と比較する. カールの大きさは Y 軸方向に単位の距離進んだ時の X 軸方向のずれで比較できる. 速度が半減すると摩擦係数 μ が増大するが, 滑走時間 t はおよそ 2 倍に長くなる点が注目される. Harrington (1924) の図 2 を参考に自転の角速度 ω は変わらないと仮定しよう.

平均の滑り距離からのずれ $P'P'_v$ は平均の摩擦係数からのずれを $\Delta\mu$ (対馬, 2011 の図 4), 接触リングの半径を r , 重力加速度を g として

$$P'P'_v = r\omega t_1 + (1/2) \Delta\mu g t_1^2 = Q'Q'_v \quad (1)$$

$P'_vQ'_v$ の長さは

$$P'_vQ'_v = 2[(r\omega t_1 + \Delta\mu g t_1^2/2)^2 + r^2]^{1/2} \quad (2)$$

$P'P''$, $Q'Q''$ 方向の滑り速度を v , 左右平均の摩擦係数を $\bar{\mu}$ とすると

$$S_a + S_b = P'Q' - 2r = (2vt_1 - \bar{\mu} g t_1^2) \quad (3)$$

棒の中心のずれ $O'O''$ は

$$O'O'' = S_b - S_a = \Delta\mu g t_1^2 \quad (4)$$

の関係式が得られる. 対馬 (2011) の図 3 に $\bar{\mu}$, 図 4 に $\omega = 0.6 \text{ s}^{-1}$ に対する $\Delta\mu$ が与えられている.

速度が半分に減小すると, 同じ単位の距離を進むのに要する時間 t_2 は t_1 の約 2 倍になるから,

$$P'P'_{v/2} = 2r\omega t_1 + 2\Delta\mu g t_1^2 = Q'Q'_{v/2} \quad (5)$$

となり, (1) 式に比べ 2 倍以上のずれが生ずる. $O'O''$ は式 (4) で t_1 を $2t_1$ に置き換えると, 4 倍大きくなる. t_1 を単位時間 (1 秒) にとったときのずれ $O'O''$ の 2 倍つまり $2\Delta\mu g$ は $O'O''$ 方向のずれ運動の加速度を与える. これらは実際のストーンの滑りで速度が遅くなるほどカールの割合が大きくなることと一致する.

1.2 自転の角速度効果

速度 V_0 を一定として, 自転の角速度が ω の場

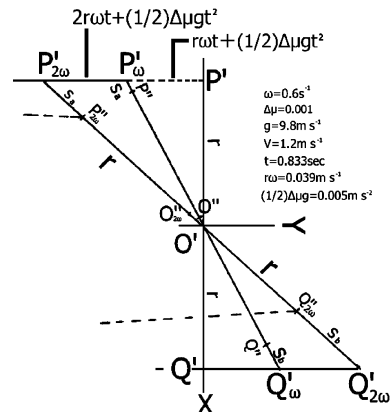


図 2 角速度の効果

合と 2ω のカールを比較しよう. 両端の速度は $V_0 \pm r\omega$ から $V_0 \pm 2r\omega$ に変わる. 自転の角速度が 2 倍になれば左右両端の平均摩擦係数からのずれも 2 倍の $2\Delta\mu$ に変わる. この角速度の効果も図 2 に示した. 角速度が大きくなると $O'O''$ のずれも大きくなる作図となった. この点, 実際のストーンのカールとはあわないように思われ, 問題を残している.

2. 摩擦と摩擦力

荷重 W を受けて固体面上を滑っている物体の運動を持続させるには引く力 F を常に加え続ける必要がある. 力 F が必要なのは接触面に摩擦があるためである. この運動を妨げる摩擦はどのようにして発生しているか理解するには, 接触面がどうなっているか知る必要がある. 分子オーダーで観察すると, 表面は凹凸に富んでおり見かけの接触面はほとんどが隙間で, 密着しているのは突起先端であったり, 突起同士の噛み合い, 硬い方の突起が柔らかい方の表面へくっ込むなどごく一部である (図 3). 密着部が真の接触面で見かけの接触面から区別される. 摩擦は真の接触面で起きている. 上に述べた運動を続けるのに必要な力 F

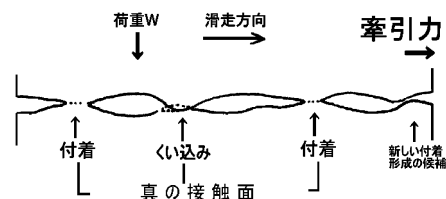


図 3 ミクロに見た摩擦面

は主に真の接触面の凝着や付着部の剪断, 掘り起こしに要する力である. 平面同士の摩擦の場合, 凝着や付着部は破壊と形成が同時進行でおこなわれ, 真の接触点は刻々と変化する. だから滑り運動を続けるのに力 F が必要なのであり, 外力としての摩擦力の作用はない. 滑り摩擦のある場合の水平面上での物体の運動方程式をたてるときは, μ を動摩擦係数, m を滑走体の質量, g を重力加速度として,

$$F = -\mu mg \quad (6)$$

とおく. 右辺を摩擦力と称している.

摩擦の起源や摩擦の本質の理解なしに, 上の式だけを扱っていると摩擦力は実在する力という誤解を招く懸念がある. だから, 本多 (1942) や佐藤 (1961) らの古い物理学の教科書では上の運動方程式とともに摩擦の起源が付記され, 摩擦力は架空の力であることが推測できる記述となっている.

摩擦力を実在する力だと信じ込んでしまうと, 摩擦の本質探究の芽が失われてしまう.

同様に月と地球の間には万有引力が働いているのに, なぜ月は地球に落ちてこないのかという疑問に対し, 衛星の運動方程式

$$F = mr\omega^2 (=mV^2 r^{-1}) \quad (7)$$

(m は質量, r は軌道半径, ω は角速度, V は速度) を持ち出して, 万有引力 F と遠心力 (右辺) が釣り合っているからだと言明していたら, 月が地球に向かって落ちつづけていることは永遠に理解されないだろう. また, 潮汐の説明によく導入され

る遠心力も真理の探究を妨げる. 余談になるが, 教育技術を高める上でこのような問題が論議されることは有益と思う.

3. おわりに

質問が寄せられた左右摩擦の異方性がカールを生ずる仕組みを図式的に示した. 左右端の長さが固定され, 左右の摩擦が異なるために Y 軸方向の滑りに伴って, 必然的に X 軸方向の滑りが発生することを示した. 本稿の内容の詳細に加え, 前後面の摩擦異方性に基づくカール発生については寒地技術論文・報告集 (2011, 27 巻) に発表される. ここに行った補足は一つの試みに過ぎず, 速度効果はよく説明されたが, 自転の角速度の効果の説明には改良が必要であろう.

摩擦力の理解には摩擦の起源つまり摩擦機構の理解が必須である. 固体間の摩擦面に認められるのは凝着や付着, 突起の食い込み (溝掘り), 凹凸の噛み合いなどである. 単位の距離当たり滑らせるのに必要な仕事 ($J/m=N$) を便宜上摩擦力と称しているのであって, 摩擦力という外力が存在するのではないことを述べた.

文 献

- Harrington, L.E., 1924: An experimental study of the motion of curling stones. Proc. and Trans. Roy. Soc. Canada, Vol. 18, Sect. 3, 247-258.
 本多光太郎, 1942: 物理学本論上巻, 112-114, (初版 1935) 内田老鶴圃.
 佐藤瑞穂, 1961: 物理学 I, 219-221 (初版 1950), 培風館
 対馬勝年, 2011: 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.

Supplementary note on curl mechanism resulting from left-right frictional asymmetry and frictional force

Katutosi TUSIMA¹⁾

1) Faculty of Science, University of Toyama

(2011 年 10 月 28 日受付)