

ジャイロ効果を利用した姿勢制御について

北里大学特別研究員 渡邊 夏輝

概要

本論文では、回転する物体に現れる「ジャイロ効果」の概説と、ボルダリング中の姿勢制御等の補助としてジャイロ効果を利用できるかどうかの考察を行なった。残念ながらボルダリングへの利用は現実的なものとは言えない結果となったが、別のパフォーマンスとして利用できる可能性は示唆された。

1 序論

自転する物体はその回転を維持しようとする性質を持つ。これを「ジャイロ効果」と呼ぶ^{*1}。ジャイロ効果は身近なところでも目にすることができ、その筆頭はコマであろう。回転していないコマを自立させることは非常に難しい。一方で、回転するコマは特に手を加えなくとも、自身でバランスを取り自立する。またコインのような円板でも同じような現象を見ることができる。これも回転していない場合には自立させるのは難しく、少しの力が加わっただけですぐに倒れてしまう。しかし回転を加えて転がせば、床の上で円を描きながら運動し、なかなか倒れない。このように、回転する物体は自身の姿勢を保とうとする。

姿勢の制御は様々な場面で必要とされる。ここではその一例として、ボルダリングを考えたい。ボルダリングは自然壁や人工壁を、道具をほとんど用いずに自身の体力と技術で登るというスポーツである。壁を登る際には重力に逆らって自分の体を自分で支えなければならず、従って常に姿勢の制御に気を配る必要がある。しかしそのために余計な体力を使えば壁を登り切る前に疲労が溜まり、頂上まで到達することができない。もし、ジャイロ効果を利用して姿勢の制御ができれば、体力の消耗を大幅に押さえられるだろう。そこで、ボルダリングに対してジャイロ効果がどの程度役に立つのか、あるいは役に立たないのか、ということ考察してみたい。

本論文では、まずジャイロ効果についてコマを例に取り簡単に解説する。続いてボルダリングへの応用を考察し、最後に得られた結果を元に結論を述べる。本論文で行う考察は全て定性的なもので、文字・数値を用いた計算は一切行っていないことをお断りしておく。

*1 ジャイロ効果の詳しい解説は、書籍なら [1]、[2]などを参照。Web上でも、例えば [3] などが見つかる。

2 本論

2.1 ジャイロ効果

回転していないコマを軸を支点にして自立させることは非常に難しい。上手くバランスを取り自立させたとしても、少しの振動や風を受けただけでたやすくバランスを崩し、横転してしまう。しかし回転を加えられたコマは、ある程度の速さで回転を続ける限り、倒れることなく立ち続ける。このように、回転するコマが倒れずに立っている要因が「ジャイロ効果」である。これは自転する物体が持つ「自転を維持しようとする性質」で、自転する物体であればどんなものでもこの効果は現れる。また物体の自転速度が速ければ速いほどジャイロ効果の影響も大きくなる。以下ではコマを例にとってジャイロ効果を簡単に解説する。

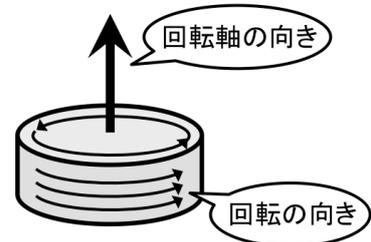


図1 回転軸の向き

まず説明の都合上、「回転軸」を定義しておく。物体の回転に対して回転の中心軸を考え、その向きを「物体が右回りなら上向き」と決める(図1)。逆に、左回りであれば回転軸の向きは下向きとなる*2。これに従って、以降は右回りの場合は「上向きの回転」、左回りの場合は「下向きの回転」というように、回転軸の向きで回転の向きを表すことにする。

さて、回転していないコマが倒れてしまう要因は重力である。図2(a)のようにコマが直立した状態であれば、重力はコマの真下(軸方向)に向かって働くのでコマを倒そうとはしない。しかし、図2(b)のように直立した状態からコマが少しでも傾くと、重力とコマの軸の向きがずれて倒れてしまう。この重力によってコマが倒れるという運動は、コマの支点に対して⊗向き*3の回転を生んでいると見ることもできる。このことを踏まえて、次に回転しているコマに考えてみる。

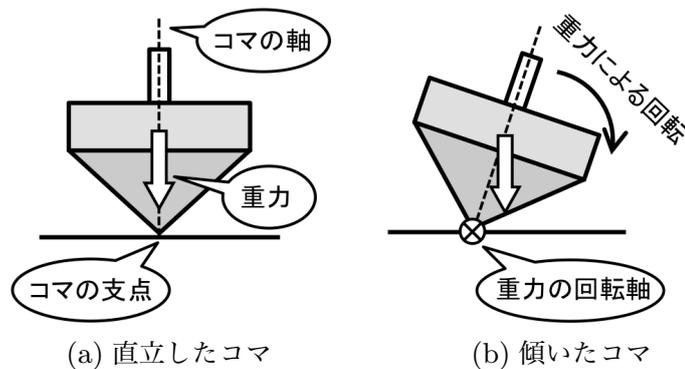


図2 回転していないコマ

ここではコマの回転は上向きとしておく。コマが直立している時に倒れないのは、回転していない場合と同じである。しかしコマが傾いている時は、回転していない場合とは事情が変わってくる。この時も重力はコマの支点を中心とした回転を生み出す。しかし、今

*2 ここではいわゆる「右ねじ」の向きで回転軸の向きを決めているが、この取り決めは逆でも構わない。

*3 ⊗向きというのは紙面の表から裏に向かう向きである。また、この逆向きを⊙という記号で表す。

はコマ自体も回転しているため、コマが2つの回転軸を持つことになる。この場合、全体の回転としては、全ての回転をベクトル的に合成したものとして表すことができる。

これを示しているのが図3である。図3(a)は傾いたコマを横から見た様子を、(b)は傾いている側から見た様子を表している。コマ自身の回転軸と重力の回転軸が合成され、その結果、コマの

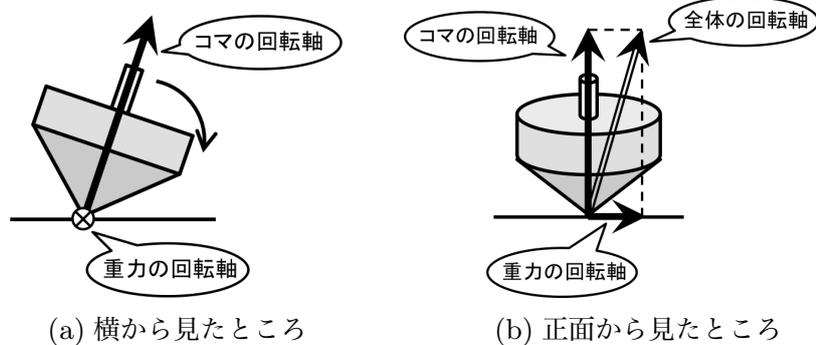


図3 回転していないコマ

回転軸は図3(b)に示した「全体の回転軸」に修正される。従ってコマは、重力が傾けようとする向き（図3(a)の曲線矢印の向き）とは90°ずれた向き（重力の回転軸の向き）に傾いていく。そして次の瞬間には再び重力の影響を受け、さらに90°ずれた向きに傾いていく。そのためコマは倒れることなく、頭を振りながら回転を続けることになる。

このように、回転する物体に力が加わると、その物体は元々の回転を維持しようとして、加えられた力とは90°ずれた向きに回転軸を移動させる。これが「ジャイロ効果」である。また、ジャイロ効果によってコマが行うような、軸を振りながら回転する運動を「歳差運動」という。ジャイロ効果の大きさは回転体の質量と自転速度に比例する。コマの場合、時間が経つにつれて自転速度は遅くなっていく。ある程度まで速度が落ちると重力に勝てなくなり、その時はじめてコマは倒れることになる。

ジャイロ効果の寄与はコマ以外でも見ることができる。身近でかつ有名なものとしては、自転車やオートバイが挙げられるだろう。これらの走行時の安定性向上に一役買っているとされている。また、ごく最近流行を見せた「ハンドスピナー」もジャイロ効果を利用した玩具の一種である。しかし、これらの解説は別の機会に譲り、ここでは新たな応用としてボルダリングを考えてみたい。そこで、次節ではボルダリングを行う際の体勢保持に、ジャイロ効果を利用できるかどうかを考察する。

2.2 ボルダリングへの応用

2.2.1 ボルダリング

ロープ等を使用して安全を確保しながら、自身の技術・体力で岩壁を登ることを「フリークライミング」と呼ぶ。ただし、ロープ等の用具はあくまで安全確保のためのみに使用し、登るため（ロープを掴んで体を引き上げるなど）には使用しない。



図4 ボルダリング

そのため、結果として他の器具には頼らず、自身の体のみで登ったとみなせることから、“フリー”クライミングと呼ばれる。

フリークライミングにおいて、安全確保用具を用いず*4、最低限の道具（クライミング用のシューズと滑り止めのチョーク）のみを用いて行うものを「ボルダリング」と呼ぶ。元々はフリークライミングの練習という扱いであったが、次第にクライミングの1つのカ

テゴリーとして定着していった。現在ではボルダリングの競技も行われており、次期オリンピックの種目に選ばれて話題になったことは記憶に新しい。屋外の自然壁を登る人も多いが、競技として行う場合は屋内に設置された人工壁を登る。以下では主に人工壁を対象として話を進めるが、自然壁の場合でも大きな違いは無い。

ボルダリングで登る壁には様々な傾斜やホールド（突起）があり、全身を駆使してバランスを取りながら登っていく。この時、体を上手く使えていないとすぐに疲労が溜まり、登れなくなってしまう。疲労が溜まる大きな原因は、自身の体重を支えなければならないことにある。腕だけでぶら下がろうとすれば、当然すぐに腕が上がらなくなる。そこで、登る際には様々なテクニックを用いて疲労の蓄積を防ぐのだが、これらのテクニックについては割愛する。ここでは先に述べたジャイロ効果を、自身の体重を支えることに利用できるかどうかを考察したい。

ジャイロ効果を引き起こすには何らかの回転体を用意する必要がある。ここでは体に装着した上で適当な動力を用いて回転させられる円環型の装置を考えてみる*5。装置の装着については、円環が鉛直方向を向くか水平方向を向くかという自由度がある（図5）。ちなみに、図5の左右方向を向くような装着も考えられるが、この場合は装置の回転軸が重力による回転軸と一致してジャイロ効果の影響を受けないので*6、考えないこととする。

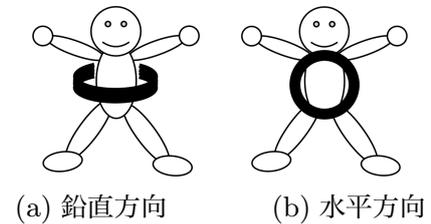


図5 回転自由度



図6 円環型の回転装置

2.2.2 ジャイロ効果の影響

まずは、回転装置が鉛直方向を向くように装着した場合を考える。その状態で、ある点に片足で立ち上がった様子が図6である。これを回転させればジャイロ効果を生じさせることができる。仮に図6のように上向き（右回り）の回転を与えたとする。ただし、回転

*4 ただし、落下時の衝撃吸収用マットは用いる（ことが多い）。

*5 「最低限の道具のみを用いる」ことがボルダリングの定義である以上、このような装置を用意した時点でもはやボルダリングではない。しかしここでは思考実験の一種と認めてご容赦いただければ幸いである。

*6 体が左右へ傾く場合はジャイロ効果の影響を受けるが、今回は前後方向のみを考える。

体の質量や回転速度は、クライマーに十分なジャイロ効果を与えられるように調整されているものとする。この場合、2.1節で見たコマと同様に、クライマーは右足のつま先を支点にして、歳差運動を行うだろう。ただし、コマと異なり人間には関節があるので、これを曲げずにまっすぐに保っておけば、という条件が付く。

この条件さえ守られていれば、どんなところに立っていても、体全体がどんなに傾いていても、崖下へ転がり落ちていくことは無い(図7)。ただし、関節をまっすぐに保つというのも相応の力が必要で、体全体の傾きが大きくなればなるほど、より強い筋力が要求される。

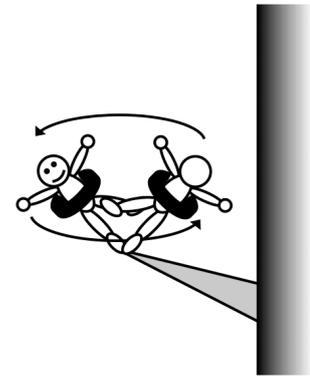
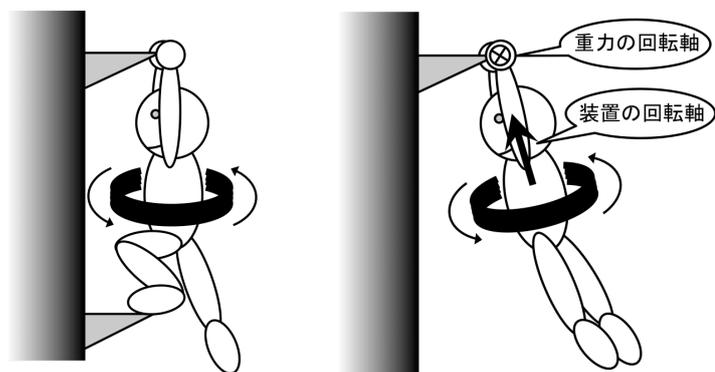


図7 傾いている場合

ボルダリングを行う上で、図6や図7のように一点に立つという状況はまず無い。そこで、もう少し自然な状況を考えてみる。

図8(a)は、回転装置を身に付けたクライマーがある壁を登っている状況を表している。この状態は十分に安定しており、クライマーに対してジャイロ効果は影響を与えない。しかし仮にここで足を滑らせてしまったとすると、ジャイロ効果の影響が現れる。ここで、先ほどと同様にクライマーの関節は、まっすぐに固定されており、またクライマーは足を滑らせたせいで、壁に対して若干傾いている仮定する。この時、図8(b)に示すように、クライマーには重力によって手先を回転軸とする ⊗ 向きの回転が生まれる。

この状況を、視点を変えて壁の正面から見た様子が図9(a)である。コマの例と同様に、全体の回転軸が重力の回転軸方向に傾くことがわかる。そして次の瞬間にはまた回転軸が傾き、これを繰り返して、結果的にクライマーは手先を支点として図9(b)のように回転してしまう。これはコマの回転を逆さまに眺めたのと同じことである。従っ



(a) 登っている途中

(b) 足を滑らせた!

図8 ボルダリング中のクライマー

て、この場合にも壁を登ることに対して、ジャイロ効果の恩恵は特に得られないということがわかる。

では、回転装置を水平方向に装着した場合はどうなるだろうか。実は鉛直方向に装着した場合と同様の結果が得られる。つまり、どのように装置を装着したとしても、ジャイロ効果を利用して体重を支えるのは不可能ということである。

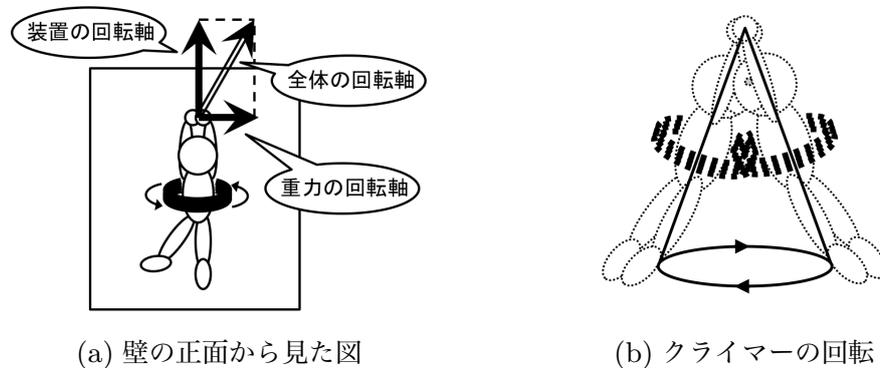


図9 ジャイロ効果の影響

3 結論

本研究ではジャイロ効果のボルダリングへの利用を考察した。その結果、残念ながら壁を登ることに對しては、特別な恩恵は得られないということがわかった。重力による回転を打ち消すためには、どうしても鉛直上向きの力を加えなければならない。従って、何か別の機構を用いて別の外力を生み出す必要がある。別の力としては、例えば電磁気力などが考えられるが、実際のところあまり現実的とは言えない。

一方で、回転装置を用いることで、一点で接したままでのような角度でもコマのように回り続けることができるので、サーカスや大道芸、あるいはマジックなどのパフォーマンスに利用できる可能性はある。ただし、傾く角度が大きくなればなるほど相応の筋力が必要となる。

今回はジャイロ効果のみに注目したため触れていないが、実はボルダリング中の姿勢制御補助はより簡単に実現できる可能性がある。それは角運動量の保存を利用するものである。実際、そのような姿勢制御装置はすでに知られており、「リアクションホイール」と名付けられている。この装置は人工衛星の姿勢制御等に使われている。ただ、リアクションホイールをボルダリングに用いた場合どうなるのかは、今後の課題とさせていただく。

参考文献

- [1] 山本義隆, 中村孔一, “解析力学1 (朝倉物理学大系)”, 朝倉書店, (1998)
- [2] 長松昌男, 長松昭男, “複合領域シミュレーションのための電気・機械系の力学”, コロナ社, (2013)
- [3] 井上順一郎, “解析力学講義”, <http://ocw.nagoya-u.jp/files/39/Mechanics4.pdf>

渡邊夏輝

1981年6月7日生まれ。首都大学東京大学院博士後期課程修了。本来の専門は宇宙論及び重力理論で、宇宙の加速膨張の研究をしています。普段は非常勤講師として幾つかの大学で物理やコンピュータを教えています。今回は趣味に走った内容にさせていただきました。ぜひ皆さんもボルダリングをしてみてください。