

LEGO を用いた機構の再現

ージェットコースターに潜む数学ー

堀越 理仁

松本 亮平

村松 宏祐

1. はじめに

私たちは、遊園地にある乗り物の機構を再現するにあたり、ジェットコースターの巻上げ部分を選んだ。そのまま再現というのはLEGOの性質上難しかったが、数学的な性質をうまく捉えることができたように思う。その再現の過程を示すとともに、その数学的性質についてまとめる。

2. 実際のジェットコースター

ではまず、ジェットコースターというものについて述べる。

ジェットコースターとは和製英語であり、正式名称はローラーコースターという。ジェット機のように加速することから、昭和30年(1995年)に後楽園遊園地に作られたものに初めて用いられ、以降この名が定着した。

そのジェット機のような加速の秘密は巻き上げ部分にある。ジェットコースターのある地点でのスピードは落差で決まる。これは位置エネルギーを運動エネルギーに変換しながら走るためである。つまり、ジェットコースターの速さは最初にどれほど高い位置にいるかによって決まるというわけだ。有名なジェットコースターほど、最初の巻上げの部分が長いのはこのためである。下の写真は富士急ハイランドのFUJIYAMAである。確かに巻き上げ部分が長いことがわかる。



このように速度を決める上でも重要な意味をもち、かつ精神的にも緊張を高めてくれる巻上げ部分だが、実際はどのようになっているのだろうか。下の写真はよみうりランドのバンデットの巻上げ部分の様子である。



このようなチェーンによる巻き上げ式のジェットコースターが一般的である。左のはしごは整備用、2本の丸い棒はレール、真ん中にあるのが車体を引っ張るチェーン部、やや右寄りにあるのが逆走防止装置である。逆走防止装置とは前方向にのみ倒れることができるようになっている装置のことで、これにより上っている最中に逆走することもなく、安全性が保たれているのである。この装置が前に倒されるたびにカチカチ音が鳴り、上っている間に緊張を高めるのにも一役買っている。また、レールは3種類の車輪によって3方向から挟み込まれている。レールの上側を走る上輪、下側から補助する下輪、横のズレを防ぐ横輪の3つであり、これらの車輪がさらにジェットコースターの安全性を高めている。

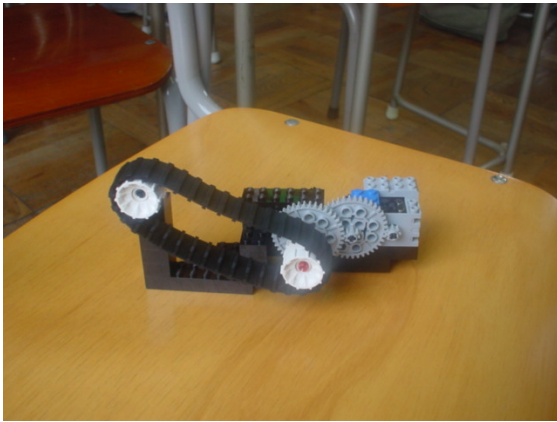
3. LEGOによる再現

では、実際にこの巻上げ部分を再現した過程を見ていく。

3.1. 初期段階

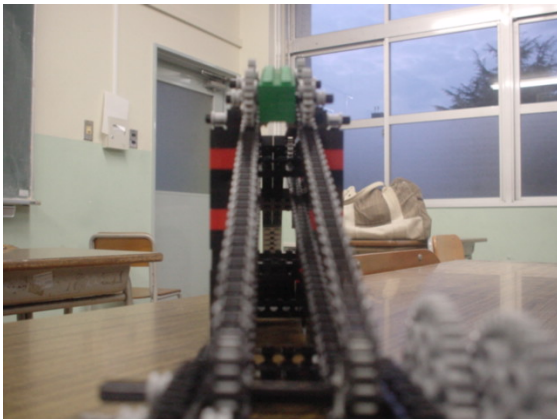
まず用いたのはキャタピラである。というのも、一番安定して車体を上に運べると判断したからである。しかし、上に挙げたような逆走装置を作るのが困難だったため、途中で

車体の自重によって逆走してしまうという事がわかった。また、横輪もないため左右のブレも起きやすく、真っ直ぐ上っていかない事も問題点として挙げられた。



3.2. 第二段階

前回の反省をふまえ、チェーンの素材を使うことにする。ギアを車輪の代わりに用いることで安定性が増す。本来は真ん中に1本あるチェーンのみで車体を上へと運ぶが、今回はレールを作ることができなかったため、安定性を重視した結果、下の写真のようになった(巻上げ部分を下から撮影したもの。2本のチェーンに車体として用いたギアが引っかかり、上へと運ばれていく)。

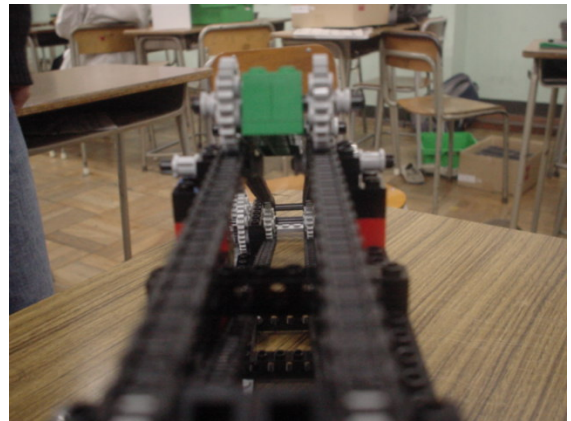


そして無事に水平な落下点まで運ばれた車体。実際のジェットコースターでは、ここままで真ん中を通っていたチェーンがなくなり、あとはレールのみとなって第1落下を始めていく。今回の再現では先ほども述べたようにレールの作成が困難だったため、2本のチェーンの間にレールのようなものを作り、それに沿って車体が落下していくような仕組みを作った。ブロックを両側に補助として設ける

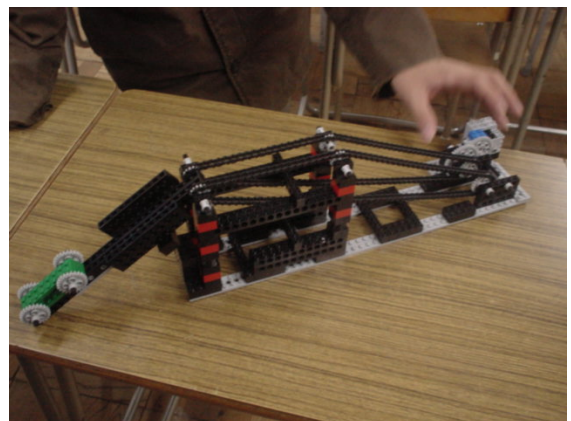
ことで、左右の安定性も確保し、真っ直ぐ落ちていくようにできた。



(バンデットのチェーンの終わり。ここから第一落下が始まる。)



(再現でのチェーンの終わり。車体の前半分はもうチェーンから離れて傾きかけている。)



(落下。行き場に困る。)

3.3. 第三段階

ここまで来たら本物のようにちゃんとスタート地点に戻ってくるものにしよう、と試みる。落ちた後進む方向を変え、柱の間を通過してスタート地点付近まで戻り、車体の前(進行

方向後ろ)を持ち上げ、チェーンにかませる、という構想の元改造を加えるが、柱の間隔を広くする、など予想以上に問題が多く断念した。

3.4. 製作について

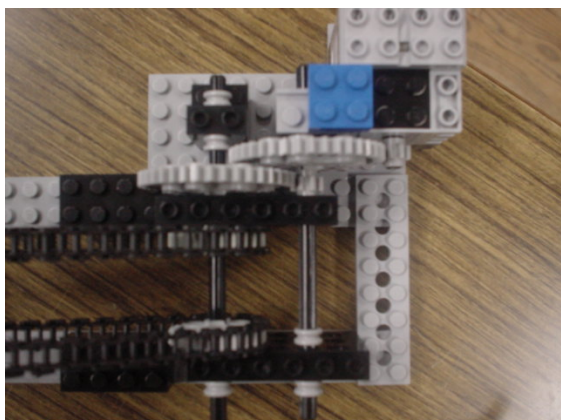
今回はレゴによる再現ということで、柱からチェーンまですべてレゴを用いて作った。しかし、どうしても直線的なパーツが多く、レールなどを作るには不適當だった。また、チェーンがたまたまあったからいいものの、そうでなければここまで再現するのも不可能だったに違いない。レゴだけにこだわらず、他の素材も使用すれば良かった、というのが反省点である。

4. ギアの回転についての数学的考察

再現にあたって用いた機構を紹介すると共に、ギアの回転という数学的性質について考察していく。

4.1. 再現における機構の役割

モーターの回転をそのままチェーンに伝えたのでは回転数が速すぎるため車体が安定せず、どこかへ飛んでいってしまう可能性がある。また、実際のジェットコースターに見られるような緊張感もなくなってしまう。そのため、機構を用いてモーターの回転数を落とすことを考えた。以下にモーターからの回転エネルギーがチェーンに伝わるまでの過程を示す。



4.2. モーター→ギア→ギア→シャフト

まずモーターの回転をギアに伝え、その後ギア→ギアの時点で回転数を減らすことができる。このとき用いた機構の KMODEL は以下のものである。

C07 Simple Spur Gear Mechanism



ここで用いられた数学的性質は、ギアの歯数と回転数は反比例するというものである。

4.1.の写真を見てわかるように、モーターの軸に小さなギア、それに大きなギアを組み合わせることで、大きなギアの属するシャフトは回転数がより少なくなることがわかる。このとき、小さなギアと大きなギアの歯数の比は 8:40 だったため、この1つの機構によって回転速度は $1/5$ になることがわかる。ギアとシャフトは一体と考えられるので、シャフトはモーターの $1/5$ の速さで回転する。さらに、このシャフトに小さいギアを取り付け、別のシャフトに大きいギアをつけたものと咬ませると、同様な機構ができ、また回転速度が $1/5$ になる。よって、モーターの回転速度に比べて、チェーンを回すギアの回転速度は $1/25$ にまで落とすことができたことがわかる。

4.3. ギア→チェーン

ギアの回転をチェーンに伝える。このとき用いた機構の KMODEL は以下のものである。

V01 Belt Drive Mechanism



これによって一定速度でチェーンが回転する。その結果、チェーンに引っ掛けられた車体が運ばれていく。



4.4. 機構作りを通じて

ギアのかみ合わせやチェーンの張り方などが、LEGOだとやや調節しづらかった。これをきちんと考慮しないと、空回りしてしまったり、たるんでうまく回らなかったりという事態が生じてしまう。

今回の機構作りで重要だったのは、ギアの歯数と回転数(回転の速さ)は反比例するという性質である。このことは、他の機構の再現にも多数用いられたことから分かるとおり、モーターの速度を自由自在に変えられるという点でとても応用性のある性質である。よって、身の回りの機構には大抵このような性質が用いられている、つまり、私たちの生活には知らない間に数学が浸透しているということがわかる。

5. 様々なコースター

実は、先ほどジェットコースターは位置エネルギーを運動エネルギーと変換することで速度を得る、と述べたが、これはあくまで一般的な型であり、他にもいくつか加速の仕方がある。各々に用いられる動力は異なり、それに応じた数学的、もしくは物理的な考察が可能である。

5.1. カタパルト式スタート

としまえんのシャトルループなどに用いられている。車体が動く基本原理は、ある程度加速させておいた「pusher」というものが車体を押し出す、というイメージである。この「pusher」は、レール下のコンベア・ベルトに取り付けられ、このベルトが動くことにより勢いよく車体を押し出す、という仕組みになっている。このベルトに速度を与える仕組

みは、昔は重りが落下するエネルギーを滑車を通してベルトに伝えるという機構を用いる「weightdrop-type」という方式が取っていたが、今ではほとんどが「flywheel-type」という方式に変わってしまった。その方式とは、カタパルト式スタートに必要な爆発的な瞬発力を発生させるために軸に flywheel(はずみ車)をつけ、あらかじめ回転数を上げておいたモーターの回転力をクラッチを切り替えることで滑車に伝えるものである。



これが「pusher」。先端(左上)に小さな突起があるのが特徴。



こちらは押される方の車体。



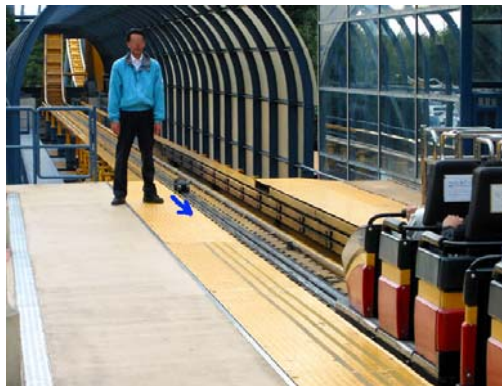
ちょうど結合したところ。



「pusher」が車体を押ししているところ。ここで爆発的な速度を加える。



押し出した時点でそこに止まる。



ゆっくりと元に戻る。この際に車体の下にぶつかることはないのだろうか?と思うと、さっきまで押されていた部分が横に回転し、ちゃんとぶつからないようになっていることがわかる。



5.2. リニアモーターカー駆動方式

ラスベガスのサハラホテル敷地内にある Speed-The Ride に用いられている。磁力によってスタート地点から瞬間的に発射されるため、「高いところから落とす」というジェットコースターにおける基本的な原理に沿わずともかなりの速度を得ることができる。従来のコースターでは最初の落下における瞬間速度が最も早く、その後は摩擦等により速度が落ちていくが、この方式の場合上昇中でも速度を上げることができるため、コース全域にわたりかなりの速度を維持することができる。また、通常のコースターを採用した場合、回転する車輪がレールを蹴って進むことになるため、いくら出力をあげても極端な急進は車輪がスリップしてしまい実現できないが、リニアモーターを採用した場合、車輪がレールを蹴る必要がなくスリップする恐れがないため、理論上いくらでも早い加速が可能となる。

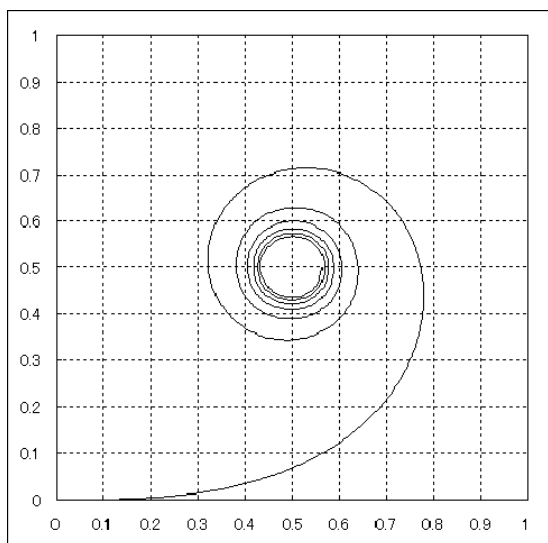
5.3. 空気圧による加速

世界最速とされている富士急ハイランドのドドンパに用いられている。エアランチ法という圧縮エアを用いた機械によってスタート後 1.8 秒で時速 172km まで加速する。しかしリニアモーターを使用している一つ前のものとは異なり、コースを進むにつれて減速していく。

6. その他の数学的性質(クロソイド曲線)

今回は特に巻き上げ部分に注目してみたが、ジェットコースター全体を見ると他にも数学的、物理的性質が見えてくる。例えば、ループのあるコースターは水平なレールからいきなりループに入るのではなく、少しずつ上向きに上がっていき、徐々にループに入るよう設計されている。これは乗っている人への負担を減らすためであり、このなめらかな曲線をクロソイド曲線という。この曲線は、一定速度で走行している車がある点で速度を落とさずにハンドルを一定の割合(角速度)でゆっくり片方向に回し続けたときにできる走行軌跡であり、物理工学の世界ではコルニユのらせんとも呼ばれている。これを式で表すと、曲率半径 R と曲線長 CL が反比例し、 $R \times CL = A^2$ (A は定数)となる。この軌道は円軌道より

も急激にではなく、少しずつ力を与えるだけで沿うことができたため、高速道路などに応用されている。



クロソイド曲線



クロソイド曲線を応用したループコースター

7. おわりに

上に挙げたもの以外にもまだまだ数学的、物理的な性質は数多く含まれるため、ジェットコースターは遊園地のただの乗り物だとなめてかかってはいけない、ということがわかりただけたかと思う。これからも技術の進歩により、ますますスリルの増したジェットコースターが出てくるのが楽しみだ。

参考文献および参考 Web サイト

八木 一正(1996). *遊園地のメカニズム図鑑*.
日本実業出版社.

<<http://kmoddl.library.cornell.edu/>>

[2007, April 8]

<<http://www.lvtainen.com/sight/html/speedride.htm>> [2007, April 8]

<http://drkssk.fc2web.com/zekkyou/zekk_main.html> [2007, April 8]