

慣性モーメントを利用した子どもの遊び

伊藤 智式
愛知学泉短期大学

The play which utilized a moment of inertia by the children

Tomonori Ito

キーワード：慣性モーメント moment of inertia、遊び play、運動エネルギー kinetic energy

1. 緒言

水平な床の上にボールを転がすとボールはしばらく転がり続ける。おもちゃの車を手で押し出せば、手から離れた後も車は動き続ける。これが慣性(inertia)の法則である。動いている物体は他から外力を受けないかぎり、そのまま動き続ける。また、静止した物体は外力が働かなければいつまでも静止し続ける。

しかしながら、実際には動いているボールもいずれは止まる。これは摩擦や空気抵抗などの外力が少なからず働いているからである。ボールが転がっていく時に、摩擦の力によってボールが変形したり、地面が動かされたりする。このために熱も発生する。また、進むボールによって空気が押し出されていく。

この抵抗がなければ、ボールは等速のままに進み続ける。摩擦の少ない氷の上で物を滑らせたり、宇宙飛行士が宇宙空間で物を投げたりした時に等速直線運動を続ける様子は、この慣性の法則をよく理解できる。

このように物が動いたり、エネルギーが変換されたりする時には、物理学のメカニズムに従っている。子どもの玩具や遊具、遊びの動きでさえも力学の法則が活かされている。回転を伴う子どもの遊びでは慣性モーメントによってその運動量が変わる。コマやはずみ車のような回転する玩具では慣性モーメントの特性を利用している。この様なからくり(メカニズム)について考察した。

2. エネルギー保存

動いている物体はエネルギーを持っている。これを運動エネルギーと呼んでいる。転がっていたボールが静止したのはその間にこの運動エネルギーが何らかの仕事をしたわけである。ボールが物に当たって止まる時もボールは何らかの仕事をしている。また、逆方向かから見ればボールは他から何らかの仕事をされたことになる。これが作用反作用の法則である。

図1のように上り坂に向かってボールを転がすとボールは坂を上って行くが途中で静止する。このときボールの運動エネルギーは0(ゼロ)になり、位置のエネルギーに変換される。その後ボールは逆方向に坂を下っていき、運動エネルギーに変わっていく。仮に、摩擦や空気抵抗等が無ければ、戻ってきたボールの速さは最初と同じになる。このようにエネルギーとはそのカテゴリーは変わってもその総量は変化しない。これがエネルギー保存の法則である。

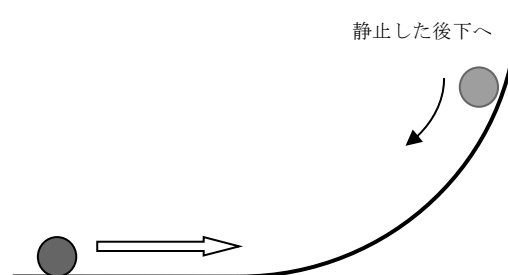


図1. 運動エネルギーが位置のエネルギーに変換し、また運動エネルギーに戻る。

子どもが遊ぶブランコでは、振り子が前後に揺られて、それぞれの上死点で止まる。その後下に向かって動きだし、地面により近づいた下死点で一番速くなる。この繰り返しの間に、位置のエネルギーと運動エネルギーが交互に変換されている。また、ブランコの振り子を大きくし高い所に上がるほど、下に来た時のスピードも速くなる。それで、振り子を大きくするためには、乗っている人が姿勢を変えて仕事をしてやればよい。さもなければ、外から誰かに押しもらえばよい。ブランコを上手に漕げない子どもは、この姿勢をかえる漕ぎ方が身に付いていない。それでも、他の人の漕ぎ方を真似したり、試行錯誤を繰り返したりながら、ブランコで遊べられるようになっていく。

また、ブランコを止める時は足で地面に仕事をして運動エネルギーを減少させていく。この仕事によって、ブランコの下地面は削れて徐々に窪みができていく。

このような物理学の法則を子どもたちは身をもって体験し学んでいく。

3. 回転の運動エネルギーと慣性モーメント

見た目は物が動いていないようでも運動エネルギーを持っている場合がある。コマが回っている時は、外見上は静止しているように見えるが、運動している。回っているコマを手で掴んで止めようとする時、摩擦を受けながら手に力が伝わってくる。これはコマ自体の重心の移動は無くても、重さを持った物体が回転している時に生じる回転の運動エネルギーがあり、このエネルギーが仕事をしたわけである。

このように、運動エネルギーには並進運動と回転運動の2つがあり、物理学的にはそれぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \text{並進運動の運動エネルギー } E_t &= 1/2 m v^2 \\ m &= \text{質量、} v = \text{速度} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{回転運動の運動エネルギー } E_r &= 1/2 I \omega^2 \\ I &= \text{慣性モーメント、} \omega = \text{角速度} \end{aligned}$$

したがって、並進運動の運動エネルギーはその物体の質量の大きさとその移動する速さによって決まる。自動車が事故で物に衝突する時、重量の重い大

型車や速度が速い車は衝撃力が大きいことはよく知られたことである。

また、回転運動の運動エネルギーはその物体の慣性モーメントと回転する速さ（角速度）によって決まる。回転しているコマは、速く回っているほどそのエネルギーは大きく、永く回っていられる。

尚、この慣性モーメント(I)とは、回転軸から離れたところにどれだけ重さがあるかを表したもので、以下のように表される。

$$\begin{aligned} I &= m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2 \\ &= \Sigma m r^2 \end{aligned}$$

m = 質量、r = 回転軸からその質点までの距離

したがって、回転の中心から離れた所に重さが集中するほど、慣性モーメントは大きくなる。図2のように、回転体としては同じ質量の物でも慣性モーメントは異なる。同じ速さで回転している時の運動エネルギーも異なってくる。

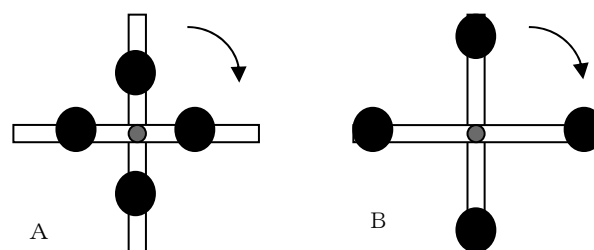


図2. 同じ質量の回転体A・B、慣性モーメント(I)はBが大きい。

慣性の法則で比較してみると、止まっている物体に力を加えて動かそうとする時、重い物ほど動かすににくい、この動かすにくさの程度は、並進運動ではその質量によってきまり、回転運動では慣性モーメントによって決まるわけである。

4. 慣性モーメントを活用した玩具

この慣性の法則と慣性モーメントの原理を、我々人類は様々なところで利用してきた。それは子どもたちの遊びの中や玩具にまでも及んでいる。

昔の子どもがよく遊んだベイゴマは初期の頃は鉄製ではなく貝を使っていた。パイ貝の殻を加工した

ものであったから、このバイが訛ってベイになったようだ。貝殻の中に粘土を入れたり、鉛を溶かして入れたりしてやれば重くなりよく回ることを心得ていた。鉄製のベイゴマにも鉛の重りを付けてやればよく回ることを試行錯誤しながら学んでいったのだろう。現代の子どもたちも、空洞の缶ゴマよりも重い鉄ゴマのほうがよく回ることを知っている。回す速さはそれほど速くすることに限界がある。それならば回す時に力はあるが、コマを重くしてやればよい。その方が、回転の慣性力、運動エネルギーが大きく勢いがあることを体験してきたのだ。但し、重くすれば地面との摩擦抵抗が大きくなりマイナスの要素になることも感じたことだろう。

正確には、コマの形やバランス、摩擦や空気抵抗が同じであれば、慣性モーメントが大きいほどコマはよく回る。但し、その分回すための力が多く必要になるわけである。したがって、コマに鉛などの重りを付ける場合、できるだけ外側に付けた方が慣性モーメントは大きくなり、運動エネルギーが大きくなる。これは式($I = \sum m r^2$)で示したとおりである。

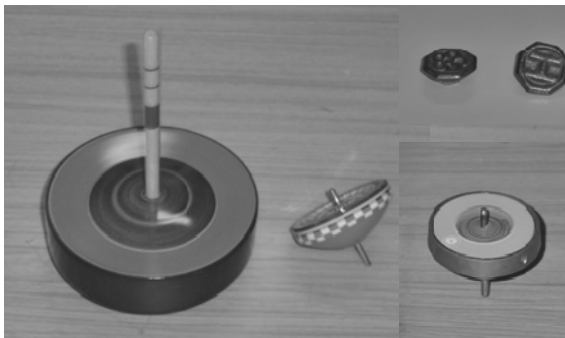


図3. コマ (大型コマ、缶ゴマ、鉄ゴマ、ベイゴマ)

ヨーヨーも回転の慣性力を利用している。手から離れたヨーヨーは下に向かって並進運動を始める。また、それと同時に巻かれていたヒモに引っ張られ回転していく。このヒモがほどけるまで、ヨーヨーの回転は加速される。ヒモがほどけた後も、ヨーヨーの回転の慣性力は維持されており、ほどかれたヒモの逆に巻き付いてヨーヨーが上に上がっていく。

これは、位置のエネルギーが回転の運動エネルギーに変換され、また、位置のエネルギーに変わるわけである。実際には、摩擦や空気抵抗などのエネルギーのロスが生じるので、元の所までは戻ってこない。そこで、最初に手でヨーヨーを押し出してやり、

エネルギーを加えることによって、元の所まで戻ることができる。

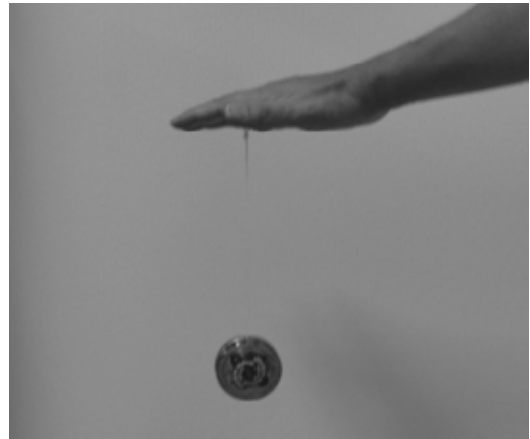


図4. 手から離れたヨーヨーは回転を加速しながら下に進んでいく。

このヨーヨーの原理に似ている遊びにブンブンゴマがある。円盤の中心に2つの穴を開けて糸を通し両端を手で持ち、円盤を回してやると2本の糸がねじれて短くなる。これを両外側に引っ張ってやると、円盤が回り出す。糸のねじれが無くなったところで引っ張るのを止めても、回転の慣性力は維持され糸が逆方向にねじられながら短くなっていく。そこで又外側に糸の端を引っ張ってやれば、回転を止めて逆方向に回り出す。これを繰り返す遊びがブンブンゴマである。このブンブンという名称は円盤が回る時に「ブンブン」と音を立てるところからきている。「ビュンビュン」ゴマと呼ぶところもある。



図5. ブンブンゴマ

円盤に切りこみを入れたり、四角にして空気抵抗を大きくしてやればブンブンとより大きな音ができる。

また、空気抵抗に負けずに大きな音を立てるには、回転の運動エネルギー、つまり $1/2 I \omega^2$ を大きくしてやればよい。慣性モーメント(I)を大きくしてやるか、速く回転(ω)させるかである。何れにしても糸を引っ張るより大きなエネルギーが必要になる。

このブンブンゴマが回っている途中で地面に離してやれば、円盤の縁と地面との摩擦によって円盤は地面を転がっていく。この時、回転運動のエネルギーの一部が並進運動のエネルギーに変わり直進していく。回転の慣性力、運動エネルギーが大きければより遠くまで転がっていける。



図6. ブンブンゴマが走り出す。

5. 慣性モーメントを活用した遊具

子どもが遊ぶ遊具でも慣性力や慣性モーメントの原理が活かされている。

回転遊具の中心軸から近い所に子どもが乗っている場合は、外で回す人のエネルギーも小さくて済む。中心軸から離れた外側に乗っている場合は、慣性モーメントが大きくなり、同じ回転速度まで加速するには大きなエネルギーが必要になる(図7)。

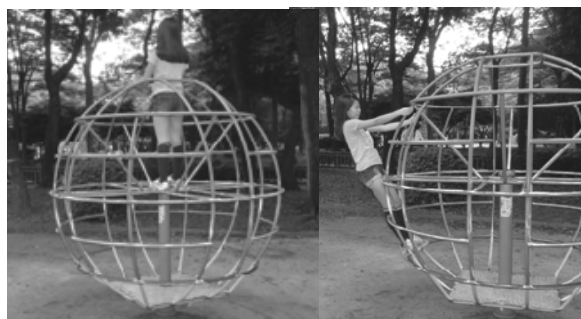


図7. 回転遊具の中心軸から近い所に乗っている時(左)よりも、中心軸から離れた外側に乗っている時(右)の方が、慣性モーメントが大きくなり、同じ回転速度まで加速するには大きなエネルギーが必要になる。

この現象はテコの原理にも似ている。シーソーで同じ体重の子どもが両側に乗る時、支点から遠くに座った子のほうがトルク(距離×力)が大きくなり下がる。このように、テコを使えば、力で得をしたり距離や速さで得をしたりできる。子どもは遊びながら科学の原理を体験し学んでいる。

図8のような回転遊具で、軸から離れた所に乗って回っていた子どもが、回転軸に近づくと回転の速度が速くなる。角速度は図8-①では 1.79rad/sec であったが図8-②のような形に変えると 5.74rad/sec ($2\pi\text{rad}=1$ 回転である)と、3倍以上の回転速度になった。慣性モーメント(I)は同じ質量の回転体でも中心軸から近い所に重さが集中するほどその値は小さくなる。この場合、角運動量($L=I\omega$)が保存されており、慣性モーメント(I)と角速度(ω)は反比例する。 I が小さくなれば ω (角速度)が速くなるわけである。但し、回転軸に身体を近づけた時、回転の運動エネルギー($1/2 I \omega^2$)は増加する。その分の仕事を加えている。回転中の遠心力に対抗し、腕の力を使って、重心を回転軸に近づける仕事をしているからである。



図8. 回転遊具で回転している時(①)に、慣性モーメントを小さくする(②)と、回転速度が速くなる。

子どもたちはこうした遊びの経験から回転のからくりを学んでいく。回転軸に近づけて小さくした方が回りやすく、遠ざけると遅くなる。でも最初に回転の勢いをつける時には大きくしてやった方がよいなどこの原理を利用できるようになる。



図9. 横に回転する時、腕を広げ横に振って勢いをつける。これで回転が加速される(①)。回っている途中は手を身体に近づけ、慣性モーメントを小さくする(②)。手を広げると止まりやすい(③)。

立った状態で横方向に回転する時、腕を広げ横に振って勢いをつける。これで回転が加速される。回っている途中は手を身体に近づける。これで慣性モーメントが小さくなり、回転速度が増す。止まる時は腕を広げると止まりやすい。これで慣性モーメントが大きくなり、回転速度が低下する(図9)。遊びの中でも上手に使っている。これはバレエダンスやフィギアスケートのスピンの時に用いる技術と同じである。

子どものでんぐり返し(前回り)では、動作の最初の加速期は身体を大きく使い、その後身体を丸く小さくした方が回りやすい。また、鉄棒の連続前回りは、ダルマ回り(抱えこみ回り)の様に身体を回転軸に近づけたほうが回り易い(図10)。宙返りでも、伸身宙返りよりも屈伸やかかえ込み宙返りのほうが回りやすい。子どもが最初に修得する前方宙返りは、殆ど屈伸やかかえ込みである。



図10. 前回り(①)とダルマ回り(②)。加速期の上から下へは大きく、慣性期の下から上へは小さくする。

6. はずみ車を利用した運動エネルギー

電気で走るおもちゃの車は、電気エネルギーを運動エネルギーに変えている。ゼンマイで動く車は、

運動エネルギーを使ってゼンマイを巻く。巻かれたゼンマイは位置のエネルギーの一種である弾性エネルギーを持っており、これが運動エネルギーに変わり車が走る。動力のない車は、手などで押し出した慣性力によって走る。フライホイール(はずみ車)が内蔵された車は、これを回転させて運動エネルギーを蓄えておき、この動力をタイヤに伝えて走らせている。このフライホイールは回転体であり、慣性モーメントを大きくしたり、回転速度を速くしたりすれば、大きなエネルギーが蓄えられる。フライホイールの仕組みを使ったおもちゃは、電気やゼンマイなどを使わず簡単な構造のものであり、昭和初期頃にはブリキのおもちゃによく使われていた(図 11)。



図 11. ブリキの玩具

フライホイールの付いた車を動かした時、他の動力のものとは違う動き方をする。その時子どもは「不思議だな」と感じるであろう。そして、知的好奇心に駆りたてながら、おもちゃを分解し、中の構造とはずみ車のからくりを学んでいくことだろう。



図 12. はずみ車の付いたブリキの玩具

そして、図 12 のブリキのおもちゃのはずみ車を見てみると、とても小さな円盤であり、慣性モーメントもけして大きくなかった。但し、タイヤの軸か

らギヤを2つ経由してはずみ車が回る仕組みになっており、ギヤ比は1 : 14であった。つまり、タイヤが地面に押し出されて1回転すれば、はずみ車は14回転する。かなり高速で回ることになる。 $1/2 I \omega^2$ であるから、慣性モーメント(I)が小さくても回転速度(ω)をより大きくすることで、大きなエネルギーが蓄えられる。

ギヤを使い慣性モーメントを小さくするメリットは、はずみ車の質量を軽量にしやすいことである。重心移動を伴うおもちゃ全体の重量を軽くし走りやすくなる。ちなみに、前に走って行かないトレーニング用自転車エルゴメーターでは、間欠的なペダル踏力を定常的に変換するためにはずみ車を用いているが、かなり大きな慣性モーメントのものを使っている²⁾。

一方、デメリットは、ギヤを多く使用することで、エネルギーの伝達ロスが生じてしまうことである。エネルギー保存の法則といえ、いくら潤滑油をさして滑らかにしても、実際には様々のところで力学的エネルギーの伝達ロスが生じる²⁾。

もし仮に、摩擦などのエネルギーの伝達ロスが限りなく軽減できれば夢が広がる。慣性モーメントの小さい軽量のフライホイールを使い、ギヤを利用し超高速回転させれば、小さな仕掛けで大きなエネルギーが保存できる。様々なところで活用されるであろう。

7. まとめ

物が移動したり回転したりする時には力学的なからくりがある。子どもが身体を使って遊ぶ動作や玩具の仕掛けにもそれがある。様々な体験の中でこのからくりを学んでいく。子どもが「不思議だな」「何だろう」と感じたとき、知的好奇心が生まれる。探求心をもって試行錯誤を繰り返し、その法則性に気づき、それを利用し応用していく。そうした時に、子どもは科学への芽生えが始まるだろう。そんな支援や環境を与えてやりたい。

引用文献

- 1) 小林佳代, 森田真樹子:『ふるさとあそびの事典』, 東陽出版, 54-57(1998)
- 2) 伊藤智式ほか: 電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ駆

動時における慣性および機械的伝達ロスの評価,
Japanese Journal of SPORTS SCIENCES, 15-2,
127-133 (1996)

参考文献

- ・永田晟：バイオキネティクス，杏林書院，(1998)
- ・Rolf Wirhed：目で見える動きの解剖学，大修館書院，(1988)
- ・金子公宥：スポーツ・バイオメカニクス入門，杏林書院，(2006)
- ・石毛勇介，川本竜史：バイオメカニクスと動作分析の原理，N A P，(2008)
- ・深代千之ら：スポーツ動作の科学，東京大学出版会，(2012)
- ・渋川侃二：運動力学，大修館書店，(1981)
- ・後藤憲一：物理Ⅱ，数研出版，(1981)