

地球回転ゴマ

若生康二郎, 石川利昭*

1. 製作の動機と方針

昭和 55 年度以降の小学校理科指導要領案によると、天文教育はこれまでより一学年繰り下げて 5 年からの、“地球の形や動き”は中学校の課程に移されることになっている。その他の天文関係の改正は分らないが、高度の科学的知識の必要なもの、直接経験しにくいもの、材料の入手しにくいものの教育は、縮少・削除される方針らしい。地球回転(本誌, 1975 年 11 月号)を、一般人に説明しても、なかなか理解して貰えないのは、まさに前記三つの理由によるものである。天文教育の時間や内容が少なくなれば、地学科の衰退・天文研究者の減少という心配も起きる。揺動のような複雑な運動でも事情は同じで、相手の理解し得る水準や経験の問題に置き換え、的確にかつ面白く説明する方法がなければ、地球回転研究の縮少・削減にもなりかねない。

大げさな模型や映画による方法もあるが、まずそれには動きのはっきりした、画になる模型を作るのが先決である。そこで理論的に正しいこと、視覚的に明瞭に、しかもポケットに入る大きさ、欲を言えば美的な地球回転ゴマという製作方針を樹てた。これまで誰も作って見せたことがないから(だから理解されなかった)、いろいろ試行錯誤を繰り返したが、出来上がったコマが回ったとき、これまでポアンソアの幾何学的表現では少しも動かなかった運動が、突然はっきりと頭の中で動き出したのは驚きであった。人間というものはやはり直観的で抽象化は不得手な動物らしい。

2. 順行・逆行歳差運動するコマ

写真 1-a は、支持台と円錐型コマの本体と芯棒である。芯棒は抜き差し可能で、任意のところでネジで固定できるようになっている。写真の状態では、重心が支点の上にあるので、コマは回さなければすぐ倒れる。これを“静的に不安定”なコマという。このコマはふつうのコマと同じように、芯棒を手で回してやると、支持棒の上で首まわし歳差運動を行なう。しかし、静的に不安定なコマでは、コマの回転方向と首まわし運動の方向が“同じ”で、順行歳差運動となる。天文学の歳差運動の説明図は、すべてこの静的に不安定なコマが画かれているから、実際の地球の逆行歳差運動がどうして起るか分

* 緯度観測所 Y. Wako, T. Ishikawa: Wobbling Top.

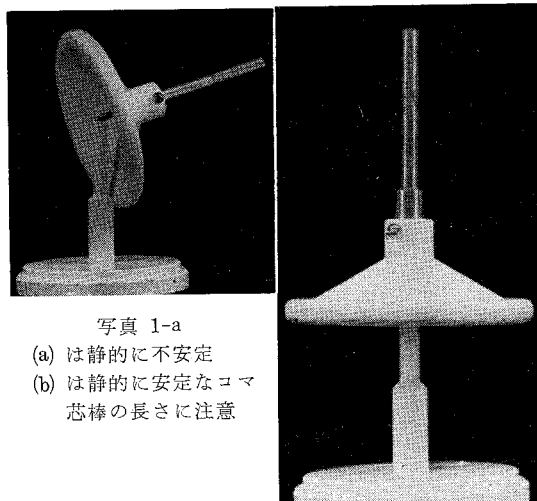


写真 1-a
(a) は静的に不安定
(b) は静的に安定なコマ
芯棒の長さに注意

写真 1-b

りにくい。

芯棒をもっと抜き出すと、彌次郎兵衛のようにいつも真直ぐ立つ性質のコマ、“静的に安定”なコマにすることができる。(写真 1-b) 静的に安定なコマの歳差運動では、コマの回転方向と首のまわる方向が“反対”; 逆行歳差運動となる。製作が面倒だと思われるかもしれないが、こうしたことはちゃんと観察させるべきである。

これまでの小学校では、ふつうのコマの性質さえちゃんと教えていなかったのである。今回の改正案では、動くおもちゃの指導が行なわれるらしい。その時は是非“静的に安定、不安定”なコマを作って、回転運動の違いをはっきり認識させてもらいたい。回転運動は力学のなかでも難しいものであるから、原理の理解は困難だとしても、回転体の不思議な運動にもっと注意を向けさせることができれば、理科教育の目的の一つは達せられると思うのである。

3. 力学(自由回転)ゴマ

芯棒を微妙に調節すると、重心と支点が一致する所がある。この場合のコマを“力学ゴマ”というそうである。力学ゴマの支点を支えたと、どんな傾きであってもそのままの姿勢を保ち、しかも回転させてもその姿勢のまま回転を続け、決して首まわし歳差運動を起さない。(90°以上傾けると支持台から落ちるし、机上のコマはどうしても回転中に少しづつ起き上るから正確な言い方ではない。) 歳差を起すコマでも、空中に放り上げると、

その瞬間の姿勢を保って上昇・落下し、その途中では首まわし運動はしない。無重力状態の回転を自由回転というが、力学ゴマは机の上でそれを実現している。

さて写真2のような螺旋状の針金に、回転させた力学ゴマを軽く触れさせると、コマは螺旋に沿って、外側から内側へ、内側から外側へ転がり始める。コマの回転速度が速ければ速いほど、針金を押す力が強く、ちゃんと持っていないと針金を支えていることができなくなる。螺旋の先端部で、急激な方向転換をして内側や外側に回りこんだり中心部分で急に外向きの運動をするのを見せると、強い印象を与えるようである。静的に安定、不安定なコマを螺旋に触れさせても、ただ一方向向きの運動を続けて螺旋から離れて行き、急激な方向転換をしない。ここで強調して置くことは、力学ゴマは決して螺旋から離れたり、空まわりも滑ってもいないことである。つまりコマが一回転すると、芯棒の外側円周の長さに等しい距離しか螺旋に沿って移動していないということである。空中にしっかり保持した螺旋（空間円錐の切り口、円い輪を考えてもよい）の外側または内側を、コマの回転する芯棒（物体に固定した円錐）が滑らずに転がるという自由回転する対称ゴマのポアンソール表現が観察される。外側の運動では、コマの回転方向と針金上の移動方向は“同じ”で、これは縦長の回転楕円体で起る。内側の場合はコマの回転と移動の方向が“反対”であり、これは最近の極運動研究で問題になっている、スウェイといわれる約1日周期の運動である。力学ゴマに言及している本は、「回転運動の力学」・鈴木至、海文堂文庫だけで、あまりよく知られていないようである。

4. 自転軸の移動

極運動とは、地球上に居る人から見た地球回転楕円体の自由回転で起る、揺動のことである。揺動の説明に入る前に回転軸の移動を理解して貰わなくてはならない。ふつうのコマは芯棒がコマの本体に固定されているから、芯棒（回転軸）が動くということとは起らない。

写真3は糸を引っぱって回す逆立ちゴマである。これに回転を与えて机の上に置くと、芯棒が傾いて

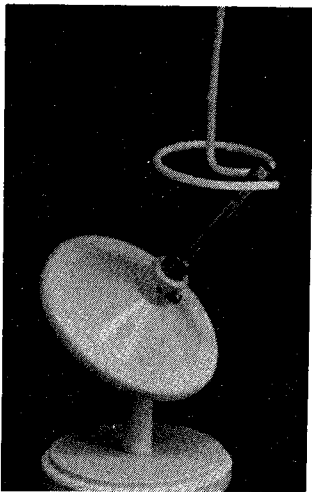
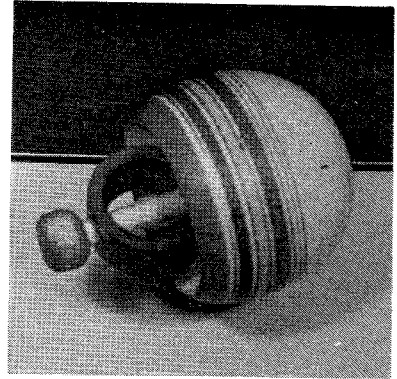


写真2 力学ゴマ

写真3 逆立ちゴマ

写真4-a, b
セロテープのフラフープ運動。テープ切断部の移動に注意



2,3秒で逆さまになり、その後は逆立ちしたままで回転を続ける。逆立ちゴマの回転をよく見ると、コマは目に見えない、机に垂直な一定方向の軸の回りに回っており、決して芯棒の回りに回ってはいない。目に見える芯棒は見掛けの芯棒であって、コマの本体は目に見えない回転軸に対してほぼ一直線

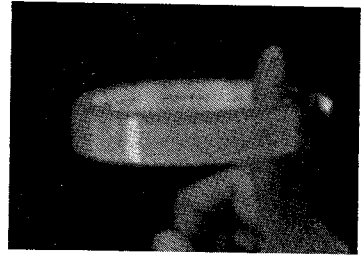


写真4-a

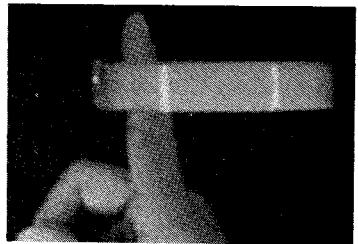


写真4-b

に傾いて行く。つまり逆立ちゴマの見えない回転軸は、コマの本体に対して瞬間、瞬間移動を続けると見てよいのである。次にセロテープを使って自転軸が円運動をする例を観察させる(写真4-a, b)。セロテープのテープ切断部を固定して、人差し指に引っかける。くるくるテープを回してテープが落ちないようにしてやると、テープの切断部が、テープの四回転に一回ぐらゐの割合で、指の腹を通過してゆくのがわかる。指の太さがテープ内側の直径と1:4になっているからそうなるのである。テープは重力に抗して空中にあり、テープと指の接点は常に回転の中心になって、テープを振り回していることが分る。テープの切断部に注目すると、テープ本体から見て回転中心がテープ円周に沿って円運動している。この場合の指は正確には空間の一定方向に固定しているわけではなく、微妙に震わせていないとテープが落ちてしまう。これに似た運動には、かつて大流行したフラフープがある(おもちゃのセミナー、戸田盛和、数学セミナー、1977年2月号)。テープやフラフープの動きを見

ていると、地球回転の揺動という言葉の意味が実感として湧いてくる。丸い地球が、宇宙空間の中で目に見えない軸のまわりに、フラダンスのように揺れ動いている。

5. 疑似揺動ゴマ

コマがコマらしいときは、正確な対称形をしており、本体の対称面に芯棒が垂直に打ちこまれている。材質のむらを見れば、このコマはビクとも動かぬ澄んだ回転をする。横長の回転楕円体である地球も、形状の対称軸をいつも回転軸としているなら、なにも無い空間で天上天下唯地球独楽の状態を続ける。何かの原因で（これが本当は大問題なのである）、少しでも回転する軸が形状対称軸から離れると、逆立ちゴマのように地球本体が見えない回転軸からどんどん離れて行く。地球の場合はむしろセロテープのように円運動を始める。写真5のような半球を作る。写真は化粧びんのプラスチック蓋で、その極部分を少し切断してある。赤道部のところに、文具店で売っている、コクヨのブリットというチューインガム状の粘着剤をつけてコマの裏側に接着する。この粘着剤は固化せずしかも強い粘着力を失なわないので、半球を何度も取り外すことができ便利であった。自由回転であるから力学ゴマの状態にして回すのが本当であるが、地上のコマはどうしても起きる性質があって、揺動状態は作れないので少し作為を施す。もともと自由回転を地上で実現するのは困難なのであるから、この揺動ゴマの時だけは、揺動に似せた運動を見せることで御勘弁を願うことにする。さて重心を少し高くしてコマが倒れるようにしておく。この状態では順行首まわし運動をするのであるが、少し回転が遅くなると、半球の切り口と支持棒が接触し、それまで芯棒の回りに回転していたのが、急に支持棒を回転の中心として回り始める。支持棒が透明であると思っ、この時の状態を観察すれば、このコマは、自由回転する対称ゴマの揺動をしているのである。支持棒と半球の切り口の接触部が瞬間回転軸、支持棒は動かぬ空間円錐、芯棒は対称軸、半球切断部は物体固定の円錐の切り口に対応している。

揺動のため極運動、すなわち瞬間的に回転軸がコマ本体に対して円運動することは、回転速度と同期した写真を撮らないと見せることはできない。分解写真にしてみせたのがアルバム写

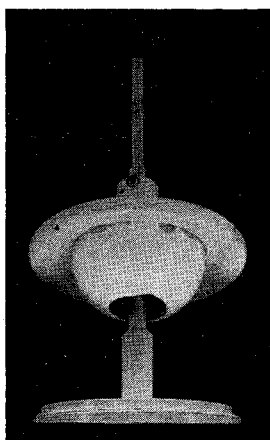


写真5 揺動ゴマ

真 1-a, b, c である。a では芯棒と、支持棒とネジおよびコマの表面に見易いように書いた黒線が、すべて真横に一直線に並んでいる。コマがすべらずに支持棒と接触しながら支持棒のまわりを回してやると、芯棒が元の真横に戻っても、ネジや黒線が約 120° ずれている (b)。もう一度同じことをすると、また 120° 、始めの位置から見て 240° ずれてくる (c)。もう一度回すと、やっと最初のように、支持棒、芯棒、黒線が真横一直線に並んだ状態に戻る。作ったコマでは、芯棒と半球切り口の直径が約 1:3 になっている。そのためコマが滑らずに支持棒のまわりを転がると、芯棒の円周に等しい距離しか半球切り口の円周上を移動しないのである。地球の場合は、空間円錐と物体円錐の頂角が 1:305 になっているので、地球の回転極が形状極のまわりを 305 日で動く、いわゆる極運動が起るのである。これは地球が剛体のときの周期で、現実地球では約 430 日のチャンドラー運動である。（正確な円錐頂角の比は、主慣性率で定る。）

地球回転ゴマはやはりコマであって地球ではない。ここで地球儀をばらし、地球回転ゴマと同じ構造にして見せると、地球が揺れ動く有りさまがもっと迫真力をもってくる（アルバム写真 2）。東京天文台の中嶋浩一さんは、地球に重い銅環をはめ、床の上で回して揺動や極運動を観察しているそうである。ボーリングの球に鉄棒を巻いたのがアルバム写真 3 である。コマにより地球が揺れ動く感じは掴めるが、空間円錐と物体円錐の説明ができないし、床の上を移動する欠点があるので、まずコマで十分説明し、その後で見せると効果的であろう。

6. 江戸コマ

日本人にとってコマの曲芸は珍らしくはないが、外国人には大へん神秘的な芸らしい。明治十年頃のお雇い外人の一人、ジョン・ペリーは本の中で（Spinning Top and Gyroscopic Motion, John Perry, ドーバー版 1.5 ドル）、浅草観音の境内で見た曲独楽のことを、当時の穏やかで美しい日本での思い出をこめて書いている。

江戸の木地玩具にお座敷コマという、形や模様が美しく、奇抜な動きをするコマがある。廣井道頭、政昭兄弟はその伝統を守る最後の人達である。彼等の作ったコマの美しさもさることながら、一度回してみるとそれまでコマとっていたものがコマと言えぬ代物でないことを痛切に感じる。道頭は仙台に住んで 200 種に及ぶ江戸コマを作っているので訪ねてみた。江戸コマの中に、揺動の動きに近いコマはないかと調べてみたら、頭かつぎという賭けコマの一種が使えそうであった。（写真 6-a, b）このコマは福助の頭の上に支持棒があり、天狗のコマを回して、止ったとき天狗の鼻がどこを指しているかを賭けるのである。天狗の長い鼻があるため、コマは滑らか

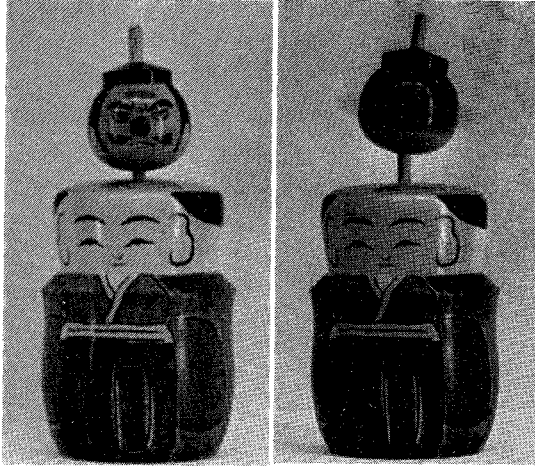


写真 6 a 江戸ゴマ 廣井道顕作, 頭かつぎ
b 天狗を回すと浮き上がる

には回らず、強く回してやると、支持棒を昇って飛び出してしまふ。傾いた首の内面が支持棒をこすり、摩擦によって首が浮き上がってくる。支持棒（空間円錐）と首の内側（物体円錐）の関係、首がすべらずに回るため空中に浮かぶところは、自由回転の模型になる。

我々の作った地球回転ゴマは、これ一つで順行・逆行歳差運動、自由回転する力学ゴマ、疑似揺動、極運動と

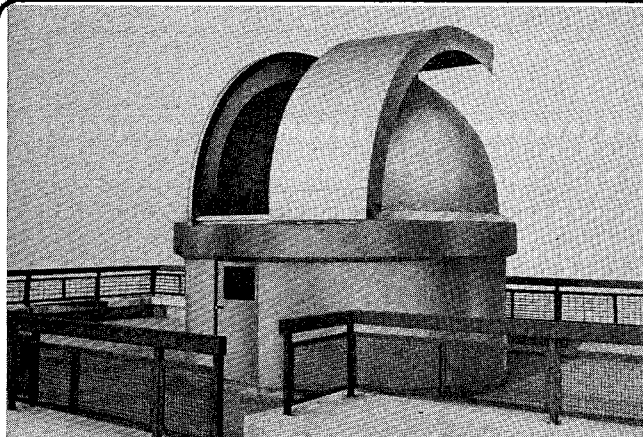
すべて見せることが出来る。それとは別に職人芸の極致ともいふべき日本伝統のコマによって、地球回転の模型となるコマがほしい。頭かつぎやその他の江戸ゴマの動きを利用して、綺麗なコマを作ってくれませんかとお頼みしてあるが、まだ期日未定である。乞御期待！

近頃、「珍しいコマの作り方」（小林実、NHK出版）という本が出版されたから、これからコマへの関心が高まって、もっと洒落た（ただし原理が正しい）地球回転ゴマが作られれば、地球回転がもっとよく理解されることであろう。

極運動の結果として観測される緯度変化の理屈は、地球回転ゴマでも理解させることができるが、補助として尾藤製作所製のピトー式半穹板（透明な半球に経緯度線を刻みつけたもの二つを使う）を利用するのが分り易い。

コマを作って思ったこと、単なる比喩や言い換えでなく、物理的内容をゆがめないで一般の人に理解させるためには、研究者が現象を本当に理解していなければならないとつくづく反省した。

宇宙船上のジャイロスコープの歳差運動から、一般相対論の実験的検証が可能である。我々の夢は宇宙船の中で、歳差と自由回転揺動を、無重力状態で観測して見たいことである。地球回転ゴマは当所高野昭三技官に作って戴いた。厚く感謝いたします。



営業品目

- ★天体望遠鏡ならびに双眼鏡
- ★天体写真撮影用品及び部品
- ★望遠鏡各種アクセサリ
- ★観測室ドームの設計・施工



← LN-10E型
25cm反射赤道儀

★総合カタログ
ご希望の方は切
手 300 円同封お
申込みください

ASTRO 光学工業株式会社

ASTRO

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321