

コリオリ力を体感できる実験

中 島 健 介*

1. はじめに

1.1 背景

コリオリ力は気象学をはじめ地球惑星科学で重要な基本概念であり、本誌にも、吉崎 (2013)、中村 (2013)、山岸 (2013) など、優れた解説が存在する。こうした数理的考察の一方、コリオリ力を実体験として認識することは、気象学の普及の上でも有意義と考えられる。しかし、後で述べるように、よく知られた教科書的な実験は大掛かりになりがちのために一般家庭や学校などでは実施が難しく、また、必ずしも直感的でないという問題点がある。

最近、筆者は地球科学に関する小学生向けのアウトリーイベントの準備の中で、教室や一般家庭でコリオリ力を文字どおりに体感することができる実験設定があることに気づいた。その後、気象学会を含めて学会の教育関連セッションで発表させて頂くとともに、大学初年級の授業やオープンキャンパスでも有効性を確認することができた。そこで、コリオリ力に関する理解の増進の一助として以下に要点を解説したい。

なお、ここに紹介する実験の原理には根本的に新しい物理は何ら含まれていないことを注意しておく。実際、教科書などの書籍、あるいは学術論文には見つからないものの、本稿の準備としてインターネット上の文献を改めて調査したところ、類似の内容を含むものを確認することができた (DeCaria 2008, および、定性的ではあるが Wikipedia 日本語版「ジャイロ効果」の項)。それでも、コリオリ力が比較的容易に「体感」できることは、あまり広く知られていない様であるので、この場を借りて改めて本学会員の注意を

喚起し、教育や普及の場で役立てて頂くことには意味があると考えた次第である。

1.2 教科書的な実験の問題点

コリオリ力についての教科書的な実験は、回転台の上でボールを投げるなど、回転系の上での物体の運動を観察するものである (例えば GFD-online 1997; MIT Department of Physics Technical Services Group 2009)。しかし、これには少なくとも二つの問題点がある。第一に、物体の運動から (みかけの) 「力」としてのコリオリ力を認識するためには、運動と力の関係 (ニュートンの第二法則) についての知識が前提となる。また、回転台上であっても実験者 (回転系に対して静止している) にはコリオリ力は働かない。そのため、物理学の初歩の知識を持たない小学生などの初学者が、その結果からコリオリ力の存在を直感的に納得することは不可能である。この困難に、コリオリ力がみかけの力 (慣性力) の一種であることが加わり、混乱が生じがちである。

第二の問題は、実験がそれほど簡単でないことである。理想的には二人以上の実験者が乗れる回転台が必要であるが、安全上の理由から公園などから回転する遊具が撤去されてしまった現在、そのような装置は身近には殆どない。また遊園地のメリーゴーランドの上でボール投げをすれば、間違いなく警備員につまみ出される。一方、レコードプレーヤーに無線ビデオカメラを用いてミニチュア実験を行うことも、レコード自体が完全に時代遅れになった今日、あまり簡単でない。

2. 提案する実験

2.1 目標

「力」は本来、物体の運動の観察以前に、たとえば綱引きなどの体験を通じて自分の体で「感じる」こと

* 九州大学大学院理学研究院。
kensuke@geo.kyushu-u.ac.jp
© 2018 日本気象学会

ができるはずのものである。実際、コリオリ力と同様に慣性力でありながら、加速度運動に伴う慣性力や遠心力は、加減速あるいは曲線運動する乗り物の中で、子供にも直感的に認識される。ならばコリオリ力についてもこれらの慣性力と同様に「体感」することが可能はずである。この目標を実現し、学校等の教室や一般家庭でも安価で容易かつ安全に行えるようなものとして、以下に二つの実験を紹介しよう。

2.2 実験その1：回転椅子上で物体を振る

回転系に対して静止した実験者が、手に持った物体を直線運動させる。このとき物体に働くコリオリ力を手で感じることができる。たとえば実験者が回転する椅子に座り、手に軽く握った杖を頭上で振ってみると、運動に伴って杖の速度に横向きに作用するコリオリ力を「手応え」として感じることができる。また、椅子の回転方向を逆にすれば、コリオリ力の向きが反転することも感じ取れる。この実験には手軽に行えるのが利点であるが、多少とも長く続けると「回転酔い」のために気分が悪くなってしまう、という難点がある。また、定量的に測定することも簡単でない。

2.3 実験その2：ジャイロの実験の見方を変えて

よく知られた「ジャイロの実験」(例えば、MIT Department of Physics Technical Services Group 2008)と同様の装置を用いた実験を回転系上で行い、得られるトルクをコリオリ力に基づいて解釈する。具体的には、車軸を延長した自転車の車輪を回転椅子に座らせた実験者に持たせ、これを回転させる。実験者には車軸を固定する努力を命じておき、そのうえで回転椅子を回すと、車軸が傾くようなトルクを感じることができる。このトルクの向きは、椅子の回転を逆にすれば反対向きになり、また車輪の回転を逆にしても反対向きとなる。場合によっては回転椅子を省略し、実験者が車軸を持ちながら自分で向きを変えてもよい。同様の実験は、最近、流行したハンドスピナーを使って行うこともできるが、大型で対称性が良く、また斜めトルクに強いベアリングが入ったものを選ぶ必要がある。

通常このトルクは慣性系で考察され、コマの歳差運動などを例とする、いわゆる「ジャイロスコープの原理」として説明されることが多い(例えば、戸田・渡辺 1990)。しかしこの実験を椅子とともに回転する系から見ると、回転系に対する車輪の各部の相対運動(車輪の回転)に伴うコリオリ力がもたらすトルクとして理解することもできるというのが本稿の主張であ

る。定量的な考察を付録に記したので参照されたい。

この実験は、先に述べた回転椅子上で物体を振り回す実験に比べていくつかの長所がある。たとえばリムに針金を巻くなどして車輪の慣性モーメントを大きくする工夫をし、あるいは車輪の回転を速くしておけば、トルクは小学生などの初学者でも即座に感じとれる強さとなり、従って回転酔いの心配なしに明瞭に体感することができる。また、車軸の両端にかかる重さを測定するなど、定量的な実験として構成することも容易なので、大学などの実験や演習の材料として発展させることも可能である。一方、結果が必ずしも直接的でないので多少の説明を要することと、装置の入手性(総額数千円であるが)や安全確保の点で、一般家庭での実験がやや難しいことは短所である。しかし学校の教室などで行うことは容易であろう。

3. まとめと議論

3.1 コリオリ力は体感できる

身近な装置で行える実験でコリオリ力を「体感」することは可能である。実際、筆者が関わったアウトリーイベントでは、小学校低学年でも上述の実験でコリオリ力の存在を体感できたし、高学年では「運動方向に直角右向きに作用する力」として明確に認識することができていた。こうした体験は、気象学の理解に進む上で有益であろう。もちろん、体感が必ずしも理解に直結しないことは、遠心力などについても誤解が絶えないこと(例えば松田 2014)からも分かるように事実としてある。それでも、力学や数学による定量的考察を進める際にも、「体感」との対比は理解を深めるために有益であると信じる。

なお、本稿で示した実験設定は、気象学に直結したものではない。そのため、気象学の知識をもつ人には「車輪はどの種類の気象擾乱に対応するのか」などの疑問も生じるようである。こうした質問の答えを考えることも興味深い。コリオリ力とは本来、気象学とは独立に、回転に関わる全ての物理系で現れるものである。実際、最近、コリオリ力は気象学などとは全く離れて工学的応用が広がっており、スマートホンのジャイロセンサーはその代表例である。したがって、地球の自転とは独立な概念としてコリオリ力に身近に触れ、その応用として気象学に進むことも正当であると考えられる。

3.2 大きな回転台の必要性

実は、最も直感的かつ有効な設定は、大きな回転台

(たとえば気象研究所の回転実験装置)の上で「直線的」に歩くことである。この際、実験者は歩行時ののみ感じられる横向きの力としてコリオリ力を感じることができる。またこれを回転台の「外」から観察すると、台上を(回転系に対して)直線歩行しつつある実験者が慣性系では曲線運動することに基づいて、コリオリ力の起源(例えばFeynman *et al.* 1963;山岸2013)を正確に理解することもできる。しかし、大きな回転台は、各地の科学館等で散発的に作られつつも有効に活用されずに廃止されがちである。危険性のために学校や児童公園などの回転遊具がほぼ全廃され、子供が回転を体感する機会が激減していることを考えると、科学館や大学などで大型回転台を設置して、種々の体験型の実験を行うことは、「フーコーの振り子」の展示以上に意義深いと考える。

謝辞

本稿完成にあたり有益なコメントを頂いたことに関して、担当編集委員である萩野谷成徳氏に感謝する。

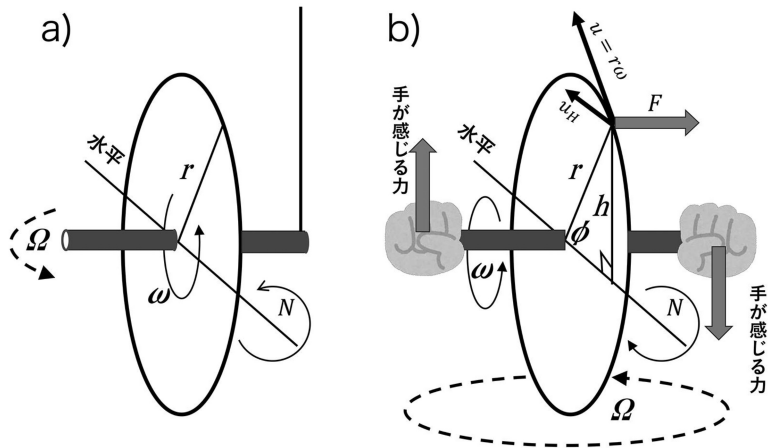
付録：定量的な考察

以下に、よく知られたジャイロスコープの実験との対応を含めて、この実験の原理を定量的に示しておく。

半径 r 、質量 M の車輪を考える。質量はリムに集

中しているとする。リムの単位長さあたりの質量は $\sigma = M/2\pi r$ 、慣性モーメントは $I = Mr^2$ となる。この車輪を車軸まわりに角速度 ω で回転させて(このとき角運動量 $L = I\omega$)、第A1図aのように車軸の一端をひもでつるして生じる歳差運動の鉛直軸のまわりの角速度を Ω とする。このときひもの張力がこの車輪に与えるトルクの大きさは $N = \Omega L = \Omega \omega I$ である(例えば戸田・渡辺 1990)。これはトルクの向きも含めて「ジャイロスコープの原理」として良く知られている。

同じ状況を、車輪の歳差と同じ角速度で回転する回転座標系の上で考える。ただし、車輪はひもではなく、この系に乗っている実験者の両手で固定されているとする。このとき、この回転座標系に対して車軸の向きは不変だが、リムは車軸のまわりに回転運動するので、この相対速度に伴ってリムの各所にコリオリ力が生じる。第A1図bのように水平方向からの角度 ϕ を測ると、リムの各位置の水平速度の大きさは $u_H(\phi) = u \sin \phi = r\omega \sin \phi$ であり、これに伴うコリオリ力は水平速度に対して右向きにリムの単位長さあたり $F(\phi) = 2\sigma \Omega u_H(\phi) = 2\sigma \Omega r\omega \sin \phi$ である。これよりリムの各所に作用するコリオリ力による全トルク(車軸を傾ける向きとなる)の大きさは、車軸からリム上の点までの距離が $h(\phi) = r \sin \phi$ であるので、



第A1図 (a) 角速度 ω で回転する車輪をひもに吊るした場合に生じる歳差運動。ひもの張力により車輪に与えられるトルク (N) が原因となり、結果として歳差運動 (Ω) が生じる。(b) 第A1図aでの歳差運動と同じ角速度 (Ω) で回転する回転系上で、同様に回転する車輪を両手で支える場合。系の回転と車輪の回転(リムに相対速度 $r\omega$ を与える)からのコリオリ力 (F) により、トルク (N) が手に与えられる。

$$\begin{aligned}
 N &= \int_0^{2\pi} F(\phi) h(\phi) (rd\phi) \\
 &= \int_0^{2\pi} (2\sigma\Omega r\omega \sin\phi) \cdot (r\sin\phi) \cdot (rd\phi) \\
 &= 2\pi\sigma\Omega\omega r^3 = \Omega\omega Mr^2 = \Omega\omega I
 \end{aligned}$$

となる。これは先に求めた「ジャイロスコープの原理」によるものと同じ大きさである。ただしトルクの向きは逆になっている。この符号の違いは、ジャイロスコープの原理によるトルクは外部から車輪に与えられるトルクであるのに対して、コリオリ力によるトルクは車輪から外部に与えられるトルクであることによる。第A2図の場合でも、このトルクが車軸から手に加わり、その反作用として手から車軸に「ジャイロスコープの原理」から得られるものと同じ向きのトルクが与えられるので、これを慣性系から見た状況（手から車軸に与えられるトルクによって車輪は鉛直軸周りを歳差運動している）と辻褄があっていることになる。

参 考 文 献

- DeCaria, A.J., 2008: The Coriolis and centrifugal torques in gyroscopic precession. http://snowball.millersville.edu/~adecaria/DERIVATIONS/Coriolis_Torque.pdf (2017. 9. 3 閲覧).
- Feynman, R. P., R. B. Leighton and M. Sands, 1963: The Feynman Lectures on Physics. Vol.1, Addison Wesley, Section 19.4.
- GFD-online, 1997: 実験室の中の空と海. URL:http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_j/index.htm (2018. 3. 2 閲覧).
- 松田卓也, 2014: 間違いだらけの物理学 (学研科学選書), 学研教育出版, 222pp., 第3章.
- MIT Department of Physics Technical Services Group, 2008: MIT Physics Demo - Bicycle Wheel Gyroscope. <http://techtv.mit.edu/videos/717-mit-physics-demo---bicycle-wheel-gyroscope> (2018. 1. 27 閲覧).
- MIT Department of Physics Technical Services Group, 2009: MIT Physics Demo - The Coriolis Effect. <http://techtv.mit.edu/videos/3714-the-coriolis-effect> (2018. 3. 2 閲覧).
- 中村晃三, 2013: コリオリ力の「ユリイカ」を読んで. 天気, 60, 475-477.
- 戸田盛和, 渡辺慎介, 1990: 例解力学演習 (物理入門コース/演習). 岩波書店, 7-4節.
- 山岸米二郎, 2013: コリオリ力の「ユリイカ」一つの試み. 天気, 60, 963-966.
- 吉崎正憲, 2013: コリオリ力の「ユリイカ」. 天気, 60, 119-124.