

赤道おじさんと Bathtub Vortex

小原 顕 (おばら けん)

所属：理学研究科 数物系専攻

専門分野：物性物理学（超低温物性／低温工学）

趣味：電子工作、ジギング、推理小説・SF



はじめに

「赤道おじさん」という人物をご存知だろうか？ 赤道直下の国々に、私の知る限り南米とアフリカに独立に、かつ複数存在するようである。赤道は何もしなくても地球規模の観光スポット（ライン？）で、場所によっては文字通りの赤い線が引いてあるわけだが、赤道おじさんたちはまさにその赤い線の近傍で、タライに水を入れて持っており、観光客の目の前で栓を抜く。排水が始まると排水口を中心とした渦 (vortex) が発生するのだが、赤い線の北側では反時計回り、南側では時計回りの渦ができる。赤い線の真上だと渦はできないし、何度やっても同じ結果がでるのだから、とても科学っぽい。これこそ「コリオリの力」という物理法則で、渦の巻き方は、まさに君たちが北半球か南半球のどちらに立っているかで決まる。遠路はるばる赤道まで来てくれてありがとう！

…この種の動画は幾つかあって、授業で紹介すると、物理学科の学生でも大多数が信じてしまう。「映像は必ず真なり」という錯覚である。熟練した物理学者も、時に騙され、騙されはしなくてもとっさに反証を挙げることに失敗する。赤道おじさんたちは、それくらいに熟練した、一流のエンターテイナーである。

コリオリの力は地球規模を必要とするか？

さて、時代はインターネットに支配されている。ネット上の賢人達は、以下に述べる理屈をもって、赤道おじさんを糾弾している： 彼らの解説は、まず、見かけの力、コリオリの力の定義から始まる。「等速回転する円板上における外力が働いていない質点の運動方程式」から始まる格調高き古典力学で、「回転するレコード盤（古代遺物）の中心にいる人が、レコードの外周部にむかって一直線に走ろうとする（等速直線運動）」という、現代人には想像不能な状況を設定し、その古代人の足跡は静止座標系 (x, y) と回転座標系 (x', y') で異なる、という中間考察を経て、「見かけの力」という、ほとんど誤訳に近い概念を導く。式で書けば以下の通り：

$$m \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \iff m \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = m\omega^2 \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + 2m\omega \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$$

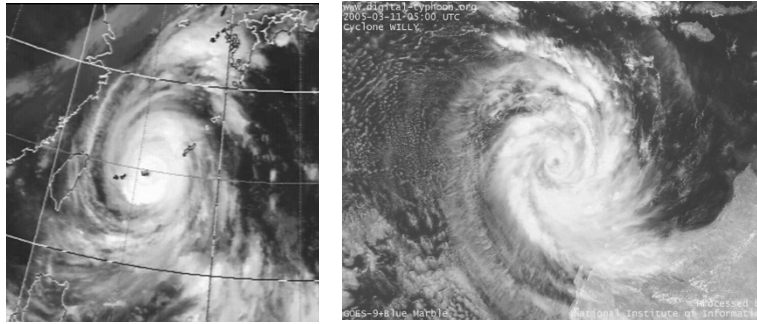


図 1：空気は高気圧から低気圧の中心に向かって吹き集められ、その過程で進行方向右向き／左向きのコリオリの力を受けている。だから台風は渦巻きになる。図は気象衛星の水蒸気画像。沖縄近海の台風とオーストラリアのウィリーウィリー。 <http://www.degital-typhoon.org/>, NII より。

ここで、 m は古代人の質量、 ω は古代レコード盤の回転速度の 2π 倍。この式変形の意義は、等速直線運動の運動方程式を単に回転座標に焼き直ただけで、第 1 項におなじみの遠心力、第 2 項に回転速度に比例するコリオリの力が現れるというもので、非対角成分があるということは、 x' 方向に進む場合は $-y'$ 方向の力を、 y' 方向に進む場合は x' 方向の力を受けるということを示しているⁱ。多くの場合、議論はなぜかレコード盤内に閉じこもっているのだが、より発展的な議論をしたい人もいて、古代人の走るべき道は、地球という球面上に拡張される。結果だけ書かせて貰えば、地球上でのコリオリの力は、古代人の速度 v 、地球の自転速度を $\Omega/2\pi$ 、緯度を θ (ただし、正を北半球、負を南半球) とすると、

$$\vec{F} = 2m\vec{v}\Omega \sin\theta$$

という大きさの力で、北半球にいるときは進行方向右向きの力を受け、南半球にいるときは進行方向左向きの力を受ける。この理論は完璧で、図 1 のように、北半球と南半球とで熱帯低気圧の雲の巻き方が反対向きになるという有名な現象を見事に説明するⁱⁱ。

賢者は引き続いて「コリオリの力を、実際に計算してみせよう！」と気焔を吐く。計算によれば、赤道からそれぞれ南北にウンメートル離れた位置とは緯度で言えば 0.000 ナントカラジアン、速さ 10 cm/s 程度で動く物体を仮定すると、働く力はおよそ pN の程度となる。水 1L にはたらく重力が 9.8 N であるのに対し、コリオリの力の絶対値は 0.0000000000001 N だ！ こんな微量が観測できるはずがなく、台風などの文字通り地球規模にならないと実現しないのだ！ そんな小さな力より、水をタライに注ぎ込むときに出来た「初期流れ」(初期条件)か「排水口の構造」(境界条件)の効果の方が大きいはずだ。従って、赤道おじさんのパフォーマンスはペテンだ！ 金返せ！

確かに、その主張に間違いは見当たらない。そして、疑ってかかれれば、動画フレームの中の赤道おじさんの動きも挙動不審ではある。しかし、コリオリの式をよく見ると、物体の運動範囲や規模を示すパラメータはどこにも入ってない。どうして地球規模なんて話がでてきたのだろう。そういえば、コリオリの力と重力とは力の向きが 90 度違うから、比べたらまずいんじゃないの？ …この違和感はなんだ…？

Shapiro の実験

自宅の風呂桶の栓を抜いたときに発生する渦 (Bathtub Vortex, BTV) も、同じまな板の上に乗る。念のために説明すると、北半球では、風呂の水が排水口に流れ込むとき、水には進行方向右向きの力がはたらくので、排水溝から反時計回りの渦が発生するのではないかと、というのが「風呂桶のコリオリの渦」説である。しかし、多くの場合、風呂桶の渦の巻き方は「最初にどちら向きの渦が発生していたか (初期条件)」と「風呂桶と排水溝の形状 (境界条件)」で決まり、コリオリの力は無視できるくらい小さい、と結論づけられる。実際そうなのである。我が家の風呂の排水溝の渦の巻き方は、初期条件に強く依存している。では、初期条件と境界条件に決着をつけたら、風呂桶にコリオリの渦は立つのだろうか？

この問いに明確な答えを出したのは、MIT の Shapiro (1916~2004) という研究者である。本人が赤道おじさんの話を知っていたかどうかは定かではないのだが…。その、緻密かつ大胆な実験の成果が結実したのは、1962年のことである。Nature 196, 1080 (1962) に掲載されているその記事は、論文ではなく、また華々しい結果を著した前後の論文に比べれば、だいぶ地味ではある。しかし、人類が量子力学や相対論を成立させてから半世紀、おりしもワトソンとクリックが DNA の二重螺旋でノーベル賞を受けた年だということに、人類はまだそのころ、古典力学起因のコリオリの渦を観測することに、まだ成功していなかったというから驚きであるⁱⁱⁱ。

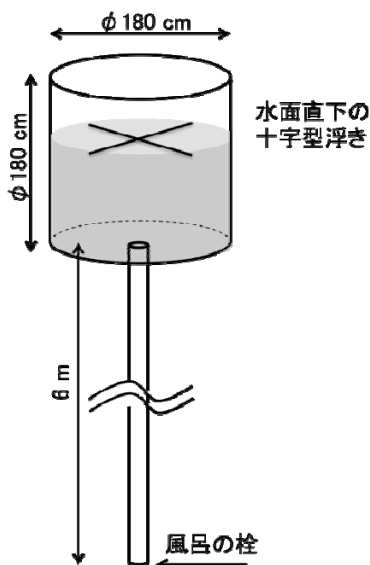


図 2：実験装置の概略

実験の概要は以下の通りである。図 2 のように、Schapiro の風呂桶は直径 180 cm 深さ 180 cm の円筒というから、一般的な五右衛門風呂である。底の形状は平らで、排水用に直径 9.5 mm の直パイプが中央に付いている。境界条件を排除するため、完全なる軸対称構造。さらに、直パイプの長さは 6 m あり、「風呂の栓」はパイプの先についている。これは、栓を抜く時に発生する水への擾乱を排除するため、タライに手を突っ込んで栓を引き抜くようでは話にならない。風の影響と温度勾配の影響を排除するため、装置全体を透明カバーで覆い、室温も制御した^{iv}。そして、もっとも重要なのは、最初に時計回りの渦ができるように水を注ぐことであった。それでも念のため、水を注いでから 24 時間待つ^v。これで栓を抜いたあと、流れが反時計回りに変われば、コリオリの渦が立ったことの証明になる。渦

の強さを示す渦度は水面直下に仕掛けられた十字の浮子で目視する。スノコが回ると思えば良い。このように、実験装置のどこにも最先端の観測装置はなく、ナノテクも、ましてや職人芸があるわけでもない。根気を除けば、誰にでもできる。予算規模など、想像するまでもない。

実験は、MIT 構内(北緯 42 度)で行われ、予想通り、見事に反時計回りの BTV の発生が確認された。より正確には、水を注いでからしばらくの間は時計回りの流れがあり、それがや

がて静止し、その後、反時計回りに回り始めたのである。定常状態に達したあとの渦度は、MIT の緯度から予想される理論値と一致した^{vi}。見事な実験である。

この記事は発表された当時、強い批判にさらされたという。しかし、さまざまな人々によって、しかも南北高緯度低緯度様々な場所で追試がおこなわれた。高校の授業や科学クラブも、データの蓄積という意味で重要な役割を果たした。装置と手法が簡単だからこそ、であろう。やがて、それは誰もが信じる「科学的事実」と認識されるようになる。その過程ではだれも、本人を密室に閉じ込めて「ホンマか、ホンマか？」と問い詰めたりはせず、だれもが真実と認め得る結果を得た。そして、50 年が経つと実験はやがて伝説となり、伝説の常として、都合の良いところだけが引用され、今日に至る。

「風呂桶の渦は、コリオリの力によってできる」と。

なぜ、pN という小さな力が観測できたのか？

現代ならば、pN を直接制御／観測できる装置はたくさんあるに違いない。しかし、時は 1960 年代、そんなセンサーが存在していたとは思えない^{vii}。観測するためには、観測できるはずのない微小信号を観測しなければならないという一種のジレンマだが、Schapiro は諦めなかった。高尚な装置を用いることなく、莫大な予算を投入するわけでもなく、しかし、実質的に pN のコリオリの力による渦を観測したのである。ネットの賢人の視点になく、Schapiro にあった視点：それは、水が流体であるという単純な事実である。すなわち、液体には流れだけでなく粘性と慣性がある----- 初期流れは、粘性のために十分待てば十分に小さくなる。実際、五右衛門風呂程度なら 24 時間まてばコリオリの渦の実証には十分で、果てしない時間がかかるわけではない。また、慣性のため、水にコリオリの力が加わっても、すぐに流れは生じない。回転流が観測されるまでにはある程度の時間が必要で、Schapiro はそのためには 15 分程度が必要だったと述べている。小さな力であっても、実質的に長時間積算しているので、五右衛門風呂の水を回転させるのに十分な力になったというわけである。また、風呂の容積とパイプの流れやすさを考慮して設計しなければ、渦が確認される前に水がなくなってしまうだろう。赤道タライは、たとえ対称性が良くても、超人的テクニックで「渦なし水注ぎ」を行ったとしても、すぐにタライから水がなくなってしまうので目視できる渦まで発達しないはずである。

それでも、五右衛門風呂程度の大きさでコリオリの力で渦ができるとは認めがたい向きもあるだろう。コリオリの渦の観測には台風なみの地球規模でないと観測できないはずだという錯覚は、おそらく、渦度が小さすぎるために流線の曲率も小さくなっているだろう、という誤認に基づくものと思われる。ひょっとすると、地球の自転を過小評価しているのかもしれない。

赤道おじさん、BTV と続いたら、最後にどうしてもこの話を書きたくなった。最後の数行、紙面を汚すのをご容赦いただきたい。

「北半球と南半球では、巻き貝の巻き方が異なるんだよ」

「じゃあ、赤道直下に巻き貝はいないの？」

「南の海には、しゃこ貝しかいないんだよ！」

赤道おじさんのショーは、しゃこ貝ネタとおなじ、エンターテイメントである。手品と一緒に、楽しみたければ騙されてみるのも心地よい。あーだこーだと考えるのも良い。しかし、思い込みや、聞きかじった理論を振り回すと、恥をかくかもしれない。真っ向から糾弾するのなら、せめて、先人の叡智、50年前の記事1本くらいは引用するのが公正である。現代は検索の世の中、英文で論文検索すれば、BTVの記事は見つかるのだから^{viii}。そう言う私のこの記事のどこかにも、きっと間違いがあるに違いない。不勉強か無知かは知らないが、いつか恥をかく日がくるのではないかと危惧している。しかし、批判者も、その批判者も、また立場は同じ。讃えられるべきは、最初に実践した人のみ。

¹ わざわざ難しく述べているが、何のことはない、レコード盤を操作する絶対静止神からみたら、ただまっすぐ進んでいるだけなのだが。ちなみに、見かけの力が誤訳といったのは、あたかも「本当はそんな力はない」といっているようだからである。誰もが感じているように、遠心力もコリオリの力も、回転系に乗っている人にとっては存在している。

¹ 北半球では、放った砲弾の着弾点がほんのわずかに東にずれるというのが艦砲射撃の常識だそうである。

¹ さらに言えば、フランスのコリオリがその定式化を行ってから120年も経っている…。もっとも身近な風呂桶の水でコリオリの渦が発生するか否か、そんなことも確かめられなかったとは、物理学者の怠慢でなくて何であろう？

¹ 残念ながら、温度制御の精度とその意義に関しては、詳しい記述はない

¹ 地球の自転だけで、排水による流れがなければ、コリオリの渦は発生しない。

¹ 残念ながら、数値的根拠示されていない。

¹ 地上における太陽光による光の輻射圧（光子ロケットの原理）は、およそ $5\mu\text{Pa}$ といわれる。 1cm^2 あたりにかかる光の力は 500pN 。1902年、この力は捻れ秤の原理を使って計測されている【Nichols and Hull, Phys. Rev. **13**, 307 (1901)】ので、剛体系なら測るすべはあったかもしれない。しかし、流体にかかる力はどうだろう？ ちなみに、輻射圧を実測した人物はのちにMITの学長になる。

¹ 日本語のサイトは唯一、物理学会の記事：<http://www.jps.or.jp/books/jpsjselectframe/2012/files/12-07-1.pdf>

英語のサイトでは、MITの自家の解説記事：<http://www.technologyreview.com/article/429479/verifying-a-vortex/>