

潮汐力の正しい理解のために

For Correct Understanding of the Tidal Force

藤原 隆男（京都情報大学院大学）

Takao Fujiwara (The Kyoto College of Graduate Studies for Informatics)

Abstract

潮汐の原因である月による潮汐力は、正しく説明するのが案外むずかしく、地学の教科書でも「潮汐力は月による重力と地球の公転運動による遠心力の合力である」という誤った解説がなされている。その誤解の原因を考察したところ、原因のひとつは「遠心力」という用語の誤用であり、もうひとつは地球と月との共通重心を中心とする遠心力を地球から見たときに現れる力についての誤解であると考えられる。潮汐力の説明に遠心力を使うことの問題点が長年にわたって指摘されているにもかかわらず、公的機関のウェブサイトなどでもいまだに正しい説明ができていないのは、潮汐力の理解がそもそもむずかしいためではないかと思われる。

本稿では、電磁気学で広く使われている場の概念を遠心力に対して使うことを提案し、教育関係者が潮汐力についての正しい理解を得られるための一助としたい。

Correct explanation of the tidal force exerted by the Moon seems to be difficult. In the textbooks of earth science in Japan, an incorrect description has been used for many years: “the tidal force is a combined force of the gravity by the Moon and the centrifugal force due to the revolution of the Earth around the common center of mass.” According to the author’s consideration, this misunderstanding comes from an improper use of the word “centrifugal force” and a misunderstanding of the centrifugal force seen from the Earth. Although some researchers have pointed out this problem many times, incorrect explanations still appear even on web sites of public institutions. This indicates that it seems rather difficult to understand the tidal force for many people.

In this article, the author proposes to use the concept of field, which is popular in electromagnetics, for the centrifugal force to help educators reach a correct understanding of the tidal force.

1. はじめに

潮汐力の説明として「潮汐力は月による重力と地球の公転による遠心力の合力である」という表現がよく使われる。ここで、地球の公転とは、地球と月の共通重心の周りの公転のことである。じっさい、高校の地学の教科書では、潮汐力はこのように説明されている。また、ウェブで検索してみると、気象庁の「潮汐の仕組み」や、JAXA 宇宙情報センターの「月の満ち欠け」でも潮汐力を同じように説明している。ところが、じつはこの説明は誤りである。潮汐力の説明に遠心力を使うことの問題点は 10 年以上も前から多くの人に指摘されている。とくに、松田卓也氏は書籍 [1] や論文 [2] で注意を喚起しておられる。筆者も、学生時代から遠心力を使った説明には違和感を持っていたが、数年前に松田氏の論

文を読んで問題の奥深さがわかってきた。そこで、本稿では潮汐力についての誤解の原因を考察し、正しくわかりやすい説明を試みる。そして、本稿が教科書やウェブ上で見られる誤った説明を正していく一助になることを目指す。

2. 潮汐力とアインシュタイン

日本天文学会の天文学辞典 [3] では「潮汐力」はつぎのように説明されている。すなわち「天体の各部分に働く重力と天体の重心に働く重力との差のことを潮汐力とよぶ」。じつに明快である。潮汐力の対象は天体でなくてもかまわない。たとえば、地球の重力に引かれて自由落下するエレベータにも潮汐力は働く。これは、重力の大きさや向きが場所によって異なるからである。エレベータの各点に働く重力

は、地球に近い側では強く、遠い側では弱い。また重力は地球の中心に向かうので、エレベータの横側では重力が斜め向きになる。そこで重心に働く重力との差をとると、図1の黒い矢印のように、地球の方向にはエレベータを引き伸ばそうとする力が、それと垂直な方向にはエレベータを押す力が残ることがわかる。これが潮汐力である。このような小さい乗り物に働く潮汐力は弱いですが、それでも無視できない力である。たとえば、国際宇宙ステーションもエレベータと同じように地球に向かって自由落下している（ただし、地球にぶつからないよう秒速7.7kmで横へ逃げつつけている）ので内部は無重力に近いが、潮汐力が残っている。国際宇宙ステーションは100mほどの大きさがあるので、端の方ではそれなりの潮汐力を受ける。計算してみると、初めは静止状態で浮かんでいても10分後には10mほど移動してしまうことがわかる。

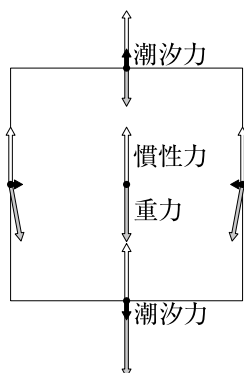


図1 自由落下するエレベータ。重心では重力と慣性力が打ち消し合うが、それ以外の場所では潮汐力が残る。

しかし、なぜ重心に働く重力との差をとるのか。これには、「慣性力」を思い出す必要がある。物体には、運動状態を続けようとする性質＝慣性がある。この慣性のため、加速度運動をするものに乗ると見かけの力が現れることになる。これが慣性力である。たとえばバスが急停車するとき、バスに乗っている乗客は慣性があるのでそのまま前へ進み続けようとする。これをバスの中で見ると、前向きの力が現れて乗客が前へ引っ張られるように見える。このように、慣性力は、慣性系（静止系と等速直線運動する座標系をまとめて慣性系という）では見えず、加速度系に乗ったときだけ現れる見かけの力である。上下運動のときも同様で、たとえばエレベータが降下を始めると、上向きの慣性力が現れて一瞬からだが軽くなる。とくに、重力に身を任せて自由落下するときは、重心での重力と同じ大きさで逆向きの一様

な慣性力がエレベータ全体に現れ、重心では力が打ち消し合って無重力になる。このように、重心に働く重力とは逆向きの慣性力を加えること、つまり重心に働く重力との差をとることが、落下するエレベータの内部で見える力を理解するためには自然なことである。このとき、わずかに残った力が潮汐力である。

じつは、重力に身を任せて運動すると重力が消えることに目を付けたのがアインシュタインである。重力がなくなると、力を受けない空間すなわち慣性系になる。自由落下するエレベータの中は地球から遠く離れた空間と同じだ、というわけである。アインシュタインは、重力を消すことができるのは重力と慣性力の根源が同じであるためだと考え、一般相対性理論を作った。また、重力に身を任せた空間を局所慣性系とよんだ。局所という語を付けたのは、無重力にできるのが重心だけで、その周辺には潮汐力が残ってしまうからである。ちなみに、国際宇宙ステーションの環境も、無視できない潮汐力があるので、無重力環境ではなく微小重力環境とよばれている。

3. 慣性系で見た潮汐力

自由落下するエレベータを、月に向かって「落下」する地球で置き換えたのが図2である。地球に乗って見ると、月に向かう加速度運動のため地球全体に一樣な慣性力が働く。慣性力の大きさは地球の中心での月による重力と等しく、向きは重力と逆である。時計回りに90°回せば図1とほとんど同じになる。

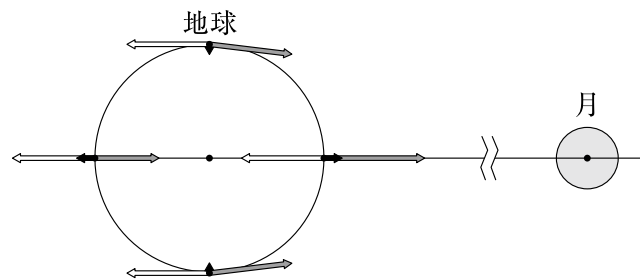


図2 地球の各点に働く月の重力（グレーの矢印）と地球全体に一樣に働く慣性力（白い矢印）を足すと、潮汐力（黒い矢印）が残る。地球の重心では重力と慣性力がちょうど打ち消し合う。

エレベータとの違いは、地球と月が互いにぶつからないように横によける運動、いわゆる公転をしていることである。質量の比から計算すると、地球と月の共通重心は地球の内部にあり、地球と月はこの

共通重心の周りを回っていることになる。地球の公転運動を入れて描き直したのが図3である。簡単のため円軌道を仮定している。また、図2と同様に地球の自転を止めて考えている。地球の中心は破線の円に沿って動いているが、地球の向きは変わらないこと、つまり円に沿って平行移動していることに注意されたい。地球の運動方向がしだいに月の方へ曲がるのは、もちろん月による重力のためである。このように、図2と比べて横へよけながら落ちているという違いはあるが、地球が月に向かって加速運動することによって、地球から見ると一様な慣性力が現れることに変わりはない。

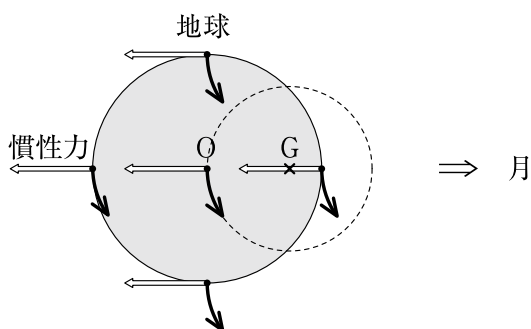


図3 共通重心の周りの地球の運動。点線は地球の中心が描く地球の公転軌道。地球の加速度運動のため、地球全体に一様な慣性力が働く。

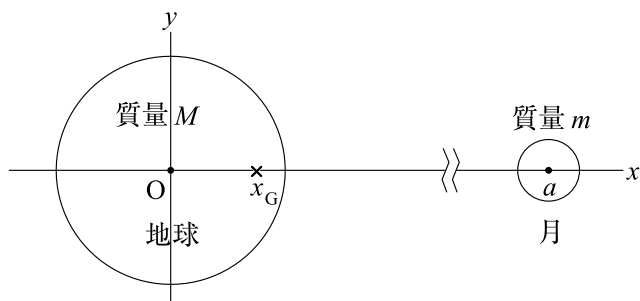


図4 地球の中心を原点とする座標系

ここで、少し式を使ってみよう。図4のように、地球の中心を原点とし、月の方向をx、月の進行方向をy、北をzとする。また、地球の質量をM、月の質量をmとし、月までの距離をa、共通重心までの距離を x_G とする。重力定数をGとすると、単位質量あたりのポテンシャルエネルギーVは地球自身による重力ポテンシャルと月による重力ポテンシャルの和になる。すなわち

$$V = -\frac{GM}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + V_m \quad (1)$$

ここで V_m は月による重力ポテンシャルで

$$V_m = -\frac{Gm}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}} \quad (2)$$

と書ける。力ではなくポテンシャルを用いたのは、その方が簡潔に書けるからである。もし力の式が必要であれば、ポテンシャルを微分して符号を変えればよい。

式(2)を、 x, y, z がaに比べて十分小さいとして2次の項まで展開すると、月による重力ポテンシャルはつぎの式で近似できることがわかる。

$$V_m \cong -\frac{Gm}{a} - \frac{Gm}{a^2}x - \frac{Gm}{a^3}(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2) \quad (3)$$

最初の項は定数なので無視してよい。第2項は地球全体が月から受ける一様な力（あるいは地球の中心に働く重力）を、第3項は潮汐力（あるいは地球の中心に働く重力からのずれ）を表す。したがって、潮汐力は、月によって地球各点に働く重力と地球の中心に働く重力との差である、と表現してもよい。このように、潮汐力は遠心力とは関係なく出てくる。地球の座標系に乗って見ると、この第2項（地球の中心に働く重力）が、地球の加速度運動による慣性力と打ち消し合うわけである。

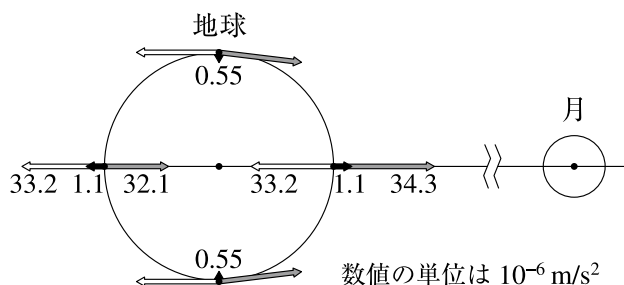


図5 地球の各点に働く力の大きさ。潮汐力は、重力や慣性力に比べてずいぶん小さいことがわかる。

この式を用いて潮汐力の大きさを計算した結果が図5の数値である。地表での重力加速度 9.8 m/s^2 と比べると、月の方向での潮汐加速度はその約1千万分の1、月と垂直な方向での潮汐加速度はさらにその半分であることがわかる。これを等ポテンシャル面（位置エネルギーが一定の面）の高さに換算すると、月の方向では+0.36m、月と垂直な方向では-0.18mになる。平均±27cm。これが、月による潮汐力の大きさである。

4. 回転系で見た潮汐力

以上で見てきたように、潮汐力の説明に遠心力は必要ない。しかし、図3のように慣性系から見ると地球と月の位置が時間とともに変わるので、式(1)、(2)、(3)は一瞬しか成り立たないことになる。これを避けるには、公転とともに回る回転系に乗るのが自然である。

また式を使おう。共通重心を原点とする座標系を使うのが自然かもしれないが、地球の中心を原点とするほうが式が簡単になるので、図4と同じ座標系を使うことにする。

遠心力は慣性系では見えない。回転系に乗って初めて見える力である。逆に、回転系に乗ると必ず遠心力が現れる。遠心力は見かけの力なので慣性力の一種である。ただし、落下運動で現れる一様な慣性力と違って、遠心力は回転軸と垂直な方向に放射状に働く外向きの力で、その大きさは回転軸からの距離に比例するという特徴がある。この遠心力を表すポテンシャルを V_c とすると、回転系におけるポテンシャルは、地球の重力によるポテンシャルと月の重力によるポテンシャルと遠心力ポテンシャルの和になる。すなわち、

$$V = -\frac{GM}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + V_m + V_c \quad (4)$$

遠心力ポテンシャルは、つぎのように書ける。

$$V_c = -\frac{1}{2}\Omega^2[(x-x_G)^2 + y^2] \quad (5)$$

ただし、

$$x_G = \frac{m}{M+m}a \quad (6)$$

$$\Omega^2 = \frac{G(M+m)}{a^3} \quad (7)$$

ここで Ω は公転の回転角速度である。ところで、式(5)を展開し、式(6)を使って書き換えると、遠心力ポテンシャルはつぎのように書けることがわかる。

$$\begin{aligned} V_c &= -\frac{1}{2}\Omega^2(x^2 - 2x_Gx + x_G^2 + y^2) \\ &= \frac{Gm}{a^2}x - \frac{1}{2}\Omega^2(x^2 + y^2) - \frac{1}{2}\Omega^2x_G^2 \end{aligned} \quad (8)$$

上記の2行目の式で、第1項は一様な慣性力を、第2項は地球を中心とする遠心力を表す。つまり、共通重心の周りの遠心力は、一様な慣性力と地球中心の遠心力に分けることができるということである。これは本稿で最も重要なところなので、あとで詳しく述べよう。

けっきょく、式(3)すなわち月による重力と式(8)すなわち共通重心の周りの遠心力を加えると、地球の中心に働く月の重力と地球の運動による一様な慣性力が打ち消し合う結果、

$$V_m + V_c \cong -\frac{Gm}{a^3}(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2) - \frac{1}{2}\Omega^2(x^2 + y^2) + \text{const.} \quad (9)$$

という簡単な式になる。右辺の第1項は潮汐力、第2項は地球を中心とする遠心力である。第2項の遠心力は地球を公転面方向に膨らませようとする力であるが、向きによらないので潮汐には寄与しない。ちなみに、この遠心力は周期27.3日の公転運動によるものである。実際の地球は、回転系に対してさらに24時間50分という短い周期で自転しているので、赤道方向にかなり膨らんでいる。

ところで、地学の教科書が「地球の公転運動による遠心力」とよんでいるのは、式(8)の第1項のことである。式を見るとわかるように、これは地球全体に加わる一様な慣性力である。このような力を遠心力とよぶことはできない。太陽系力学の有名な教科書“Solar System Dynamics”[6]でも、一様な慣性力のことを「大きさと向きが等しい遠心力」と書いているが、この表現は遠心力の定義と矛盾する。もともと共通重心の周りの遠心力に含まれていた力であり、月に振り回されること（ほんとうは引っ張られること）で生じる力でもあるので「遠心力」とよびたい気持ちはわかるが、放射状でもない力の場を遠心力とよぶのは無理がある。一様な慣性力としかいいようがない、というのが筆者の見解である。

遠心力を回転軸以外の場所から見ると一様な慣性力が出てくることは、力の場を矢印で表すとよくわかる。図6は共通重心の周りの遠心力の場を z 方向から見たもので、共通重心は図の中心にある。遠心力を軸方向から見るとこのように放射状に見える。

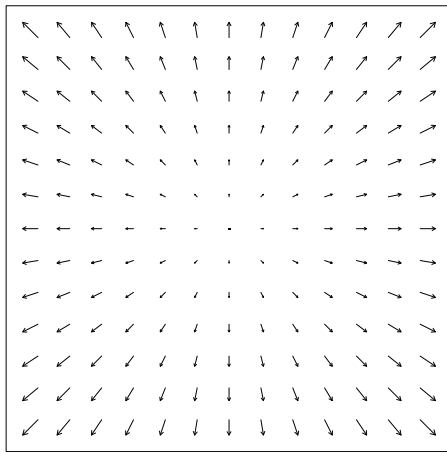


図6 回転系で共通重心の周りに現れる遠心力。

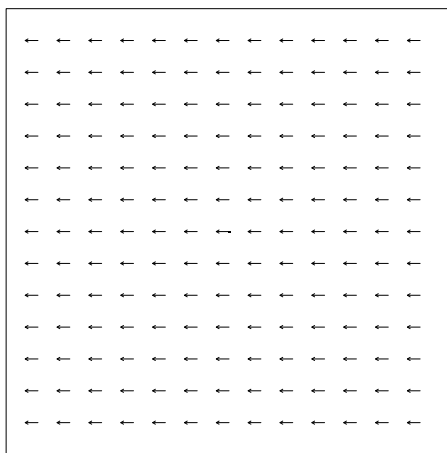


図7 共通重心の周りの遠心力を分解したとき、地球全体に加わる一様な慣性力成分。

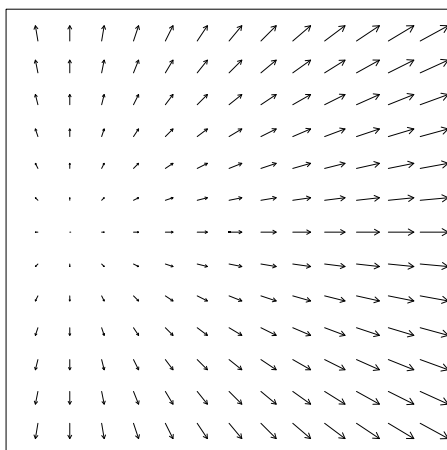


図8 共通重心の周りの遠心力を分解したときの地球(図の左端近く)を中心とする遠心力成分。

図6の遠心力場を2つの力に分けると、一様な慣性力(図7)と地球を中心とする遠心力(図8)になる。地球を中心に考えるときは、このように2つの成分に分ける方がわかりやすい。図7と図8は、式(8)の第1項と第2項にそれぞれ対応する。図7と図8の力の場合を重ねると図6の遠心力になることは容易に理解できるであろう。また、図7のような力が遠心力でないことは明らかであろう。

共通重心の周りの遠心力を地球から見ると一様な慣性力が見えることは、じつは中学校の数学で理解できる。遠心力ポテンシャルは2次関数である。そのx成分だけを考え、共通重心の周りの遠心力ポテンシャルと同じ形をした $(x-a)^2$ という式を考えよう。この式を展開すると $x^2 - 2ax + a^2$ になる。第1項は地球を中心とする遠心力、第2項は一様な力の場合に相当する。このように、一次式の2乗を展開すると2次の項と1次の項が出てくる。それだけのことである。

潮汐力の単純で明解な説明は、「地球の各点における月の重力と地球の中心に働く月の重力との差」であろう。これを合力として説明すると、本稿で見てきたように、「地球の各点における月の重力と公転運動によって地球全体に働く一様な慣性力の合力」ということになる。一様な慣性力は、地球が月に引っ張られることによる見かけの力であるが、これを遠心力(あるいは一様な遠心力)などと呼んではいけない。

5. 回転中心ではない点における遠心力

一様な慣性力と遠心力の関係を明らかにするための例として、脱水機の中の洗濯物を考えよう。常識では、洗濯物の水分が外へ離れていくのは強い遠心力が加わるからである。この描像は、脱水機の回転軸で見る限りは正しい。しかし、洗濯物にとっては事情が異なる。前節で見てきたように、遠心力を回転軸以外の場所すなわち洗濯物から見ると、一様な慣性力と洗濯物を中心とする遠心力に分けることができる。そして、洗濯物から水分を引き離そうとする力は、もちろん一様な慣性力の方である。洗濯物を中心とする遠心力ではない。洗濯物中の水分に働く力が遠心力だと思っているのは、回転中心で考えているからである。常識に反しているように聞こえるかもしれないが、洗濯物の身になって考えると脱水の力は遠心力ではなく一様な慣性力であることに

気づくであろう。

筆者自身は、脱水機と似た乗り物に乗ったことがあるので、遠心力が一樣な慣性力と自分中心の遠心力に分かれることは実感として理解できる。それは、2002年にJAXAとの共同研究でフロリダのケネディ宇宙センターを訪れたときのことであった。宇宙飛行士の殿堂という見学施設に立ち寄ったら、直径数メートルの回転アームの両端に人が乗るカプセルが付いたG Force Trainerという4G体験マシンがあった。そこで勇気を出して乗ったわけだが、外向けに押しつけられる力を予想して身構えていたところ、回転が始まったとたんに回転椅子にさせられてぐるぐる回されるような感覚が襲ってきた。その後、回転速度が一定になると回転椅子効果はおさまったが、目が回る中で考えたのが回転椅子効果の原因であった。そして気づいたのが、遠心力を回転中心以外の場所で見ると、一樣な慣性力と自身の回転による遠心力に分けられるということであった。その後者の効果で、回転速度が上がるときに回転椅子に乗って回されるように感じたわけである。いっぽう、回転によって生じる外向きの4Gの力は、乗っている人にとっては図7のような一樣な力なのである。

6. 潮汐の位相についての誤解

つぎに、現象としての潮汐について考えよう。地球の潮汐は、おもに月の潮汐力によって起こる。地球は公転に乗った回転系に対して24時間50分という短い周期で自転しているので、地上の同じ場所で見ると12時間25分ごとに満潮がやってくる。その説明として、月に近い側とその反対側の海面が膨らんだ図が教科書には出てくる。ところが、現実にはこの図のようにはなっていない地点が多々ある。たとえば日本の太平洋岸では、満潮の時刻は月の南中よりも6時間ほど遅れており、月が南中するときには干潮になっている。これは、海洋の潮汐パターンが複雑で、たまたま日本付近では干満のタイミングが逆になっているだけなのだが、この点を捉えて教科書の説明は間違っていると主張する人がネット上に何人かいる。その論理はつぎの通りである。地球に対する干満の位相の移動速度は400 m/sもあるのに対して海洋を伝わる長波の速度は水深が4000 mとして200 m/sしかない。潮汐は外力による強制振動の問題なので、固有振動数が外力の振動

数よりも低くて外力の変化に応答できないときは強制振動の理論から振動の位相は外力とは逆になるはずだ。だから教科書の図は間違いで、月の側が干潮になる。その証拠が太平洋岸の観測だ、等々。

この説は間違っている。なぜなら海洋の振動は、質点の振動ではなく波として考えなければならないからである。波であれば、波長が短くて振動の周期が短い高調波が存在しうるので、潮汐力の変化に追従した変形や共鳴が可能である。

実際の海洋は、大陸によって分断された複雑な形をしており、大陸周辺には水深の浅い大陸棚も存在する。また、地球は自転しており、海水が運動するとコリオリ力を受けるので、海洋の振動はさらに複雑になる。コリオリ力が働くときの波には、通常の長波と同様の慣性波とよばれるモードの波のほか、19世紀にケルビンが理論的に発見したケルビン波とよばれる波がある。ケルビン波は、岸で振幅が最大になるような波で、北半球では岸を右に見る向きに伝わる。たとえば北大西洋を反時計回りに回る潮汐波はこのケルビン波で説明できるという。また、水深が浅い各地の湾でも潮汐力に共鳴したケルビン波が回っている。いっぽう太平洋は広すぎるので、いくつかの振動に分かれているようである。月による潮汐パターンを数値的に解いた例を図9に示す。細かくて見えにくいですが、沿岸部には共鳴で干満の差が大きくなっているところが多い。このように、海洋は複雑なパターンを描きながら潮汐力の変化に追隨している。



図9 月による潮汐パターンの数値計算の例。実線は満潮時刻 (GMT)、破線は振幅 (cm) を表す。

7. 潮汐加速と潮汐ロック

図10は、月による海洋の潮汐変形の概念図である。実際の海面はでこぼこしているが、全体としてはほぼ潮汐力に追隨していると思ってよい。ただし、

海洋の潮汐変形は、海水と海底との摩擦のために地球の自転方向に引きずられて、角度にして 3° ほどずれている。この角度は海底との摩擦の大きさに決まり、その摩擦には共鳴で振幅が大きくなった沿岸部の海水が大きく寄与している。

いっぽう、固体地球も弾力があるので潮汐力で変形する。固体地球には硬さがあるため、変形の大きさは海洋の約0.6倍ということである。固体地球の潮汐変形も内部摩擦によって地球の自転方向にずれるが、その角度は海洋の潮汐よりもずっと小さいと見積もられている。

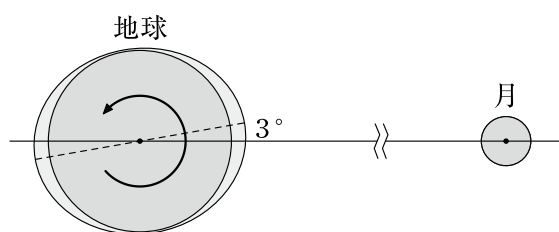


図10 地球の自転に引きずられるため、潮汐変形（潮汐バルジ）の向きは月の方向よりも少し先行する。この角度は海水と海底の摩擦の大きさに決まる。

月による潮汐の影響は、地球の変形だけではない。地球を変形させた月は、地球から何倍もの仕返しを受ける。図10のように変形した地球が月を進行方向に引っ張るのである。その結果、月は地球から遠ざかり、そのぶん地球の自転は遅くなる。潮汐加速とよばれる現象である。保存量である角運動量という語を使うと、地球の自転角運動量が月の公転角運動量に移されるといえる。月が遠ざかる速さは、アポロが月面に置いてきた反射鏡にレーザー光線を当てて測定できる。また、地球の自転周期は星の観測でわかる。それによると、月は世紀あたり3.8 mの速さで地球から遠ざかっている。また地球の1日の長さは世紀あたり約2ミリ秒延びており、それが積もった時間のずれは（世紀）²あたり約30秒になる（時間の2乗に比例する）。

図10は、角運動量が地球から月に移って月が遠ざかるようすを、月の軌道半径を横軸にして表したものである。潮汐加速の理論によると、衛星の軌道半径は時間の平方の13乗根に比例する。グラフに矢印で示した時間は、理論をもとに潮汐加速のパラメータ（地球の変形のしやすさや摩擦の大きさ）がつねに一定であるとして計算したものである。それによると、500億年ほど先には地球の自転の周期が47日になって、月の公転周期と同期することになる。もちろんそのころには太陽はすでに一生を終え

ていて地球がどうなっているかもわからないので同期が実現することはない。ところで、この図で使った過去45億年間の平均のパラメータに比べて、ここ何億年かの地球はずいぶん潮汐変形がしやすくなっているようである。というのも、測定されている潮汐加速が、過去の平均と比べて3倍も速いのである。大陸の移動による海底の変形や自転周期が長くなってきたことで海洋が潮汐力に共鳴しやすくなり、摩擦が大きくなってきたのではないかと考えられている。この調子でいくと地球の自転と月の公転の同期はもっと早まるかもしれないが、それでも太陽の最期のほうが先に来るであろう。

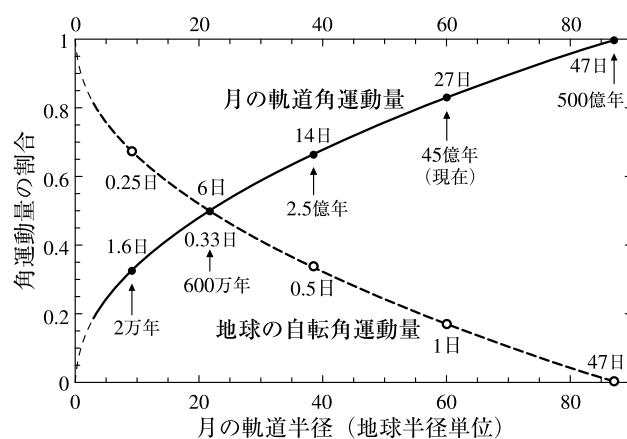


図11 潮汐加速による月の軌道角運動量と軌道半径の関係。曲線のそばの日数は地球の自転周期および月の公転周期。矢印で示したのは月形成からの時間。

このように、地球は質量が81分の1しかない月からいろいろ影響を受けている。いっぽう、月が地球から受ける潮汐力はずっと大きいので、その影響も甚大である。たとえば、現在の軌道半径で月が地球から受ける潮汐力は月面での高さに換算すると13 mになる。しかし、できたばかりの月は地球半径の数倍程度のところにいたと考えられている。潮汐力は距離の3乗に反比例するので、当時の月が受けていた潮汐力は今の1000倍ほど、高さに換算すると10 km以上はあったと思われる。自転していた月は、潮汐力を受けて大きく変形し、その変形した月は地球を引きずろうとして自転角運動量を急速に失う。その結果、月は短時間で自転できなくなる。その時間は、仮に月が地球半径の10倍ほどのところにあったとしても、わずか1000年ほどである。こうして、潮汐変形した月は同じ側を地球に向けたまま回転系に固定される（図12）。これを潮汐ロックまたは潮汐固定という。これが、月がいつも同じ側を地球に向けている原因である。

潮汐ロックは、固有の名前が付いた太陽系の主要な衛星で実現している。海をもつ地球と違って、固体の衛星では潮汐による自転減速の効率は悪いが、惑星の質量が大きく潮汐変形が激しいため、短時間で潮汐ロックに至るからである。例外は、土星の衛星ハイペリオン（衛星タイタンの軌道運動と共鳴してカオス的な自転をしている）ぐらいである。相対的に大きい衛星をもつ準惑星の冥王星では、衛星カロンだけでなく、冥王星本体もすでに潮汐ロック状態になっており、相互ロックが実現している。

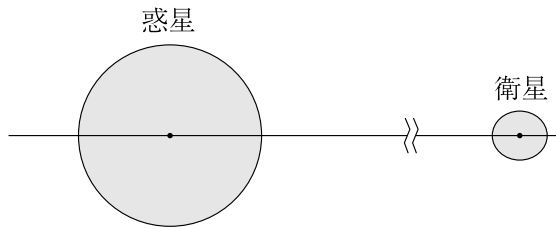


図 12 ほとんどの衛星は潮汐ロックされている。

つぎに、潮汐ロック状態になった衛星の形について考えてみよう。ロック状態の衛星は回転系に対して静止しているので、回転系で考えるのが適切である。回転系では遠心力が現れるので、衛星は潮汐力と遠心力の両方を受けることになる。いま衛星を地球の月であるとする、月の中心を原点としたポテンシャルエネルギーの式は、式 (9) で地球と月の立場を入れ替えるだけで得られる。すなわち、地球の重力によるポテンシャルを V_g 、公転運動による遠心力ポテンシャルを V_c とすると

$$V_g + V_c \cong -\frac{GM}{a^3}(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2) - \frac{1}{2}\Omega^2(x^2 + y^2) + \text{const.} \quad (10)$$

式 (7) を使って第 2 項を書き換え、さらに月の質量 m が地球の質量 M に比べてはるかに小さいので $M + m$ の中の m を無視すると、上の式はつぎのようになる。

$$V_g + V_c \cong -\frac{GM}{a^3}(x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}z^2) - \frac{1}{2}\frac{GM}{a^3}(x^2 + y^2) + \text{const.} \quad (11)$$

第 1 項が地球による潮汐力、第 2 項が月を中心とする遠心力である。式からわかるように、潮汐力と遠心力は同じオーダーの量になる。

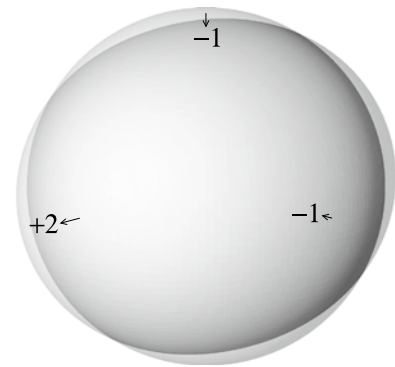


図 13 潮汐ロックされた衛星が潮汐力によって受ける変形。

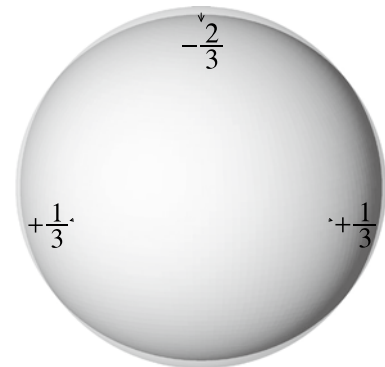


図 14 潮汐ロックされた衛星が遠心力によって受ける変形。

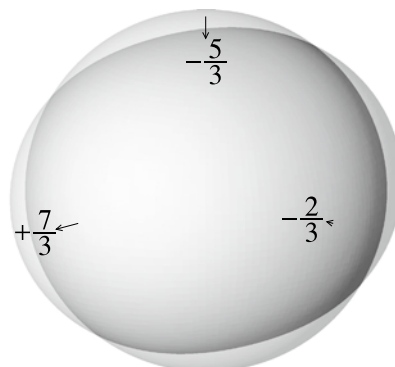


図 15 潮汐ロックされた衛星が潮汐力+遠心力によって受ける変形。

この式を微分して、月面上での潮汐力と遠心力の大きさを求めると、X 軸上と Y 軸上と Z 軸上での力は、潮汐力が $+2:-1:-1$ 、遠心力が同じ単位で $1:1:0$ という大きさになる。これらの力による変形の大きさは、潮汐力による変形が $+2:-1:-1$ 、遠心力による変形が $+1/3:+1/3:-2/3$ となる（遠心力による変形の大きさは、体積の変化が 0 になるよう規格化してある）。これらを加えると、X 軸上、Y 軸上、Z 軸上での変形の大きさは $+7/3$

：-2/3：-5/3 となる（図 13～15 参照）。衛星が十分に柔らかであれば、この比で変形するはずである。実際には、どこかの段階で衛星は固化し、その後の軌道半径の変化と惑星から受ける力の変化によって徐々に変形するため、理論どおりの形にはならないようである。

学校では、月がいつも同じ側を地球に向けているのは月の自転周期と公転周期が一致しているからだ と教えるが、それは同じ現象を別のことばで言いなおしているだけであって、原因の説明にはなっていない。ほんとうの原因は、地球の潮汐力によって歪んだ力の場に月が「はまって」いるためである。学校教育では、潮汐の話題のところで、月も地球によって潮汐力を受けていることに触れてもよいのではないかと考える。少なくとも教える側は潮汐ロックについて知っておいてほしいところである。

8. さいごに

本稿では、潮汐力の説明に「遠心力」という語を使うことが誤りであることを指摘した。地学の教科書に出てくる「遠心力」は、ほんらい「一様な慣性力」とよぶべき力である。この一様な慣性力は、地球と月の共通重心の周りの遠心力を地球から見たときに現れる力である。一般に、回転系に現れる遠心力を回転中心以外の場所で見ると、一様な慣性力が現れることも指摘した。

学校教育における潮汐力の間違った説明は、戦前からずっと続いているのではないかと思われる。というのも、太陽系力学の専門家でさえ、一様な慣性力のことを「大きさと向きが等しい遠心力」とよんでいるからである。これは「遠心力」という語の誤用であるが、これを聞いた関係者は安心して「遠心力」という語や概念を使ってしまおうであろう。これが誤用であることに気づいている天文関係者や教育関係者は声を上げて、教育現場で、あるいは気象庁や JAXA で続いている誤りを正していただきたい。

ウェブでは、自由に発言ができることから気づかずに誤った自説を主張する人が多い。たとえば、多くの人が自由に参加している Wikipedia にも間違った記事が見受けられる。英語ページは多くの人のチェックが入るのでまだ間違いが少ないが、日本語ページには誤りが目立つ。とくに潮汐力や潮汐は理解がむずかしいようで、間違った記述が多い。自分の説が正しいかどうか、批判的に検討しようとする

姿勢はもってほしいものである。かくいう筆者も間違ったことを言っていないとは限らない。本稿で述べたことについて、筆者の誤解があればご指摘くださると幸甚である。

参考文献

- [1] 松田卓也 「間違いだらけの物理学」学研, 2014
- [2] 松田卓也, 猪坂弘 「潮汐力と潮汐」
http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hiroshi.kunitomo/090413_tyoseki.pdf, 2009
- [3] 日本天文学会 天文学辞典 <https://astro-dic.jp/>
- [4] Carl D. Murray, Stanley F. Dermott, “Solar System Dynamics”, Cambridge University Press, 1999
- [5] Accad Y, Pakeris CL: Philos Trans R Soc London, A290, 235, 1978

◆著者紹介

藤原 隆男 Takao Fujiwara

京都情報大学院大学教授
京都大学大学院理学研究科修士 理学博士
京都市立芸術大学名誉教授
元京都市立芸術大学教授・美術学部長