

とやまと自然

第47巻 夏の号

No.185 2024

とくべつてん 特別展「たのしむ重力」展示解説

てんじかいせつ

～落ちる ひっばる そして、曲げられる♪～

市川 真史



とくべつてん 特別展「たのしむ重力」 展示解説

～落ちる ひっばる そして、曲げられる♪～

市川 真史

1. はじめに

ランドセルやカバンが重く感じる、ソフトクリームが地面に落ちる、寝転んで見ていたスマホが顔に落ちてくる…、これらはすべて、「重力」があるため起こる困りごとです。

一方で、私たちはいろいろなところで重力を利用しています。例えば、滑り台やブランコは、重力のおかげで遊ぶことができますし、歩くことができるのも、重力があるからです。もし重力がなければ、歩こうと一歩踏み出した瞬間に、空中に飛んで行ってしまうことでしょう。

コップにジュースや牛乳を注げるのも、重力があるからです。重力がなければ、ジュースも牛乳もコップの中にとどまっていられずに、外に出てきてしまいます。そもそもコップに注ぐこともできません。地上での人や生き物の生活は、重力があることを前提として成り立っています。

また宇宙においても、重力は大事な役割を果たしています。

地球を毎日照らしてくれている太陽のそばから地球が離れずにいるのは、重力により互いに引き合っているからです。地球が誕生するとき、元となる小惑星が集まるのにも重力が必要でしたし、太陽を含めた銀河系や宇宙全体が、現在のような姿になったのも重力のはたらきの結果です。はるか遠くの宇宙でブラックホール同士が衝突して発生した重力波が、私たちの住む地球で観測されるのは、そのブラックホールが作った重力が地球まで届いたことに他なりません。

このように、重力はあらゆるところで働き、私たちは知らないうちに利用し、恩恵をうけています。この世界は重力が支配しているといっても過言ではありません。

令和6年7月20日から9月1日まで、特別展「たのしむ重力 ～落ちる ひっばる そして、曲げら

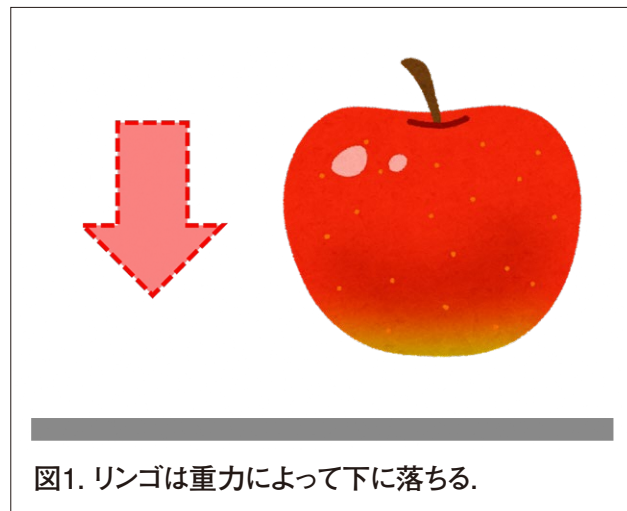


図1. リンゴは重力によって下に落ちる。

れる♪～」を開催します。日頃は意識しないけれども、私たちに大きな影響を及ぼしている重力に着目します。

地上において、重力が働く方向を私たちは下と考へ、どの場所でもほぼ等しく物が「落ちる」現象を引き起こします。ところが地球を少し離れると、重力の向きは地球の中心に向かってることが分かり、重力は物体が落ちるのではなく、物体同士が「引き合っている」力だとみえてきます。さらにブラックホールのような天体では、重力は引き合う力ではなく「物体により空間が曲げられることで引き起こされる」力として姿が変わって見えます。このように視点や条件を変えると、重力は異なる姿を見せます。

今回の特別展では、「地上では」「地球を離れて見ると」「究極に重い天体では」の3つの視点に分けて、重力の働きを紹介します。身近なブランコの動きから重力波まで、体験を楽しみ、現象を知っていただくとともに、いずれも同じ重力が引き起こしているという意外性を楽しんでいただければと思います。

2. 第一の視点 地上での重力は…

地上における日常生活では、重力が働く方向か

ら「下」の方向が認識でき、また重力はどの場所でも等しく働く、というふうにみえます（“みえます”という理由は、次章の第二の視点でお話します。）。

また、物には重さの違いがありますが、これは働いている重力の違いであり、重い物とは、重力を働かせる能力が強い物、ということになります。

2.1. 落ちる物の速さ

重い物ほど重力が強い、といっても、重い物ほど速く落ちるわけではありません。実は、重力の働きしかない場合では、重い物も軽い物も、同じ速さで落ちます。

日常生活では、重い物と軽い物を同じ高さから同時に落とせば、重い物の方が先に着地することが多いでしょう。この着地時間の違いを出しているのは、空気です。軽い物のほうが空気の抵抗の影響をより受けやすいことから、軽い物のほうが遅く着地することが多くなります。空気の抵抗で落ちる速さに違いが出ることは、例えば、ティッシュペーパーを、丸めた物と広げたままの物を同時に落としてみると確かめられます。同じ重さなのに広げたもののほうが遅く着地するのは、空気の抵抗の影響です。重力によって動く物の速さは、重さの違いとは関係ありません。

この性質から、次のおもしろい現象が起こります。的に向かって床を転がるボールが的と同時に落ち始める場面を考えます(図2)。床の上を転がるボールは、端まで来て床から飛び出すと落ち始めます。それと同時に吊り下げていた的を放し、ボールと的が同時に同じ高さから落ち始めるようにします。

ボールと的は、重さや形に違いはあっても、下向きに落ちる速さは同じですから、常に同じ高さにあります。ボールは横にも動いているので、だんだん的に近づいていき、最後は的に当たります。つまり、どんなボールや的を使っても、同時に同じ高さから落とせば、必ず当たるのです。

この様子を別の視点で見てください。仮に、私たちもボールや的と同じ速さで落ちながら観察すると、的は止まって見えます(常に同じ高さにあるため)。ボールは、床の上を転がっている時と同じよ

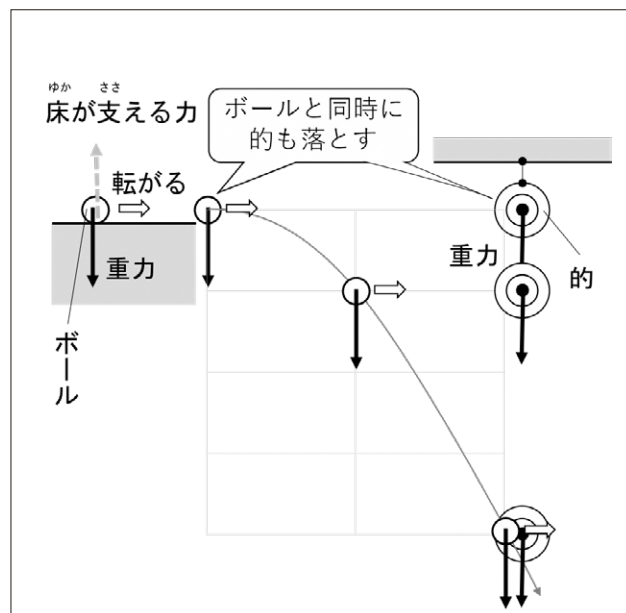


図2 ボールと的が同時に落下し、的に当たる様子(実験の様子を見たい場合は、「モンキーハンティング」というキーワードで動画検索してください)

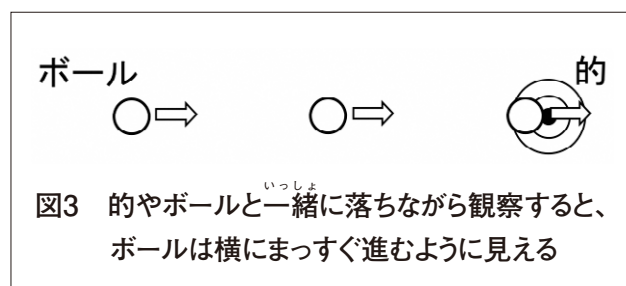


図3 的やボールと一緒に落ちながら観察すると、ボールは横にまっすぐ進むように見える

うに、水平に動いているように見えます。両方を同時に観察すると、同じ高さにあるボールが的に向かって、一定の速度で進んでいるように見えることでしょう(図3)。

この様子を実験で確かめる展示が、「実験装置：一緒に落下して観察しよう」です。本当に一緒に落ちるのは難しいので、代わりにプロジェクターでボールと的の背景に格子模様を投影し、落ち始めるのと同時に格子模様を下向きに同じ速さで動かします。すると、的は格子模様の同じ位置に居続け、ボールは格子模様上をまっすぐに動く様子が観察できます。重力による速さは重さや形に関係ないことが分かります。

2.2. すべり台

すべり台で下にすべり降りることができるのは、重力の働きです(図4)。床が傾いて坂道になっていると、坂道の床が物を支える向きは斜めになるので、重力の下向きの力をすべて支えることはできず、残った力が斜面をすべり降りる力となります。



図4 すべり台は重力の働きですべる

坂道のかたむき具合によって、ななめの力の大きさが変わり、すべり落ちる速さも変わります(図5)。

物を落とす時と同じように、重力の作用だけであれば重い物も軽い物も同じ速さですべり落ちます。ところが実際には、重力以外の作用ですべり落ちる速さに差ができます。すべる時の床との摩擦や、転がって落ちる時の転がるエネルギーなどに、重力の力が使われるためです。

この様子を実験で確かめるのが、「実験装置：先に転がり落ちるのはどっち?」です。

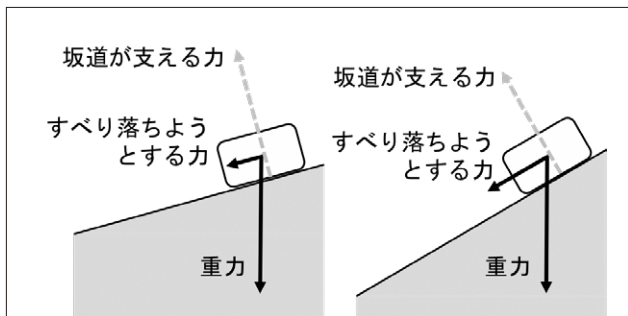


図5 すべり台は、坂道が急だとすべり落ちようとする力が大きいので、速くすべる

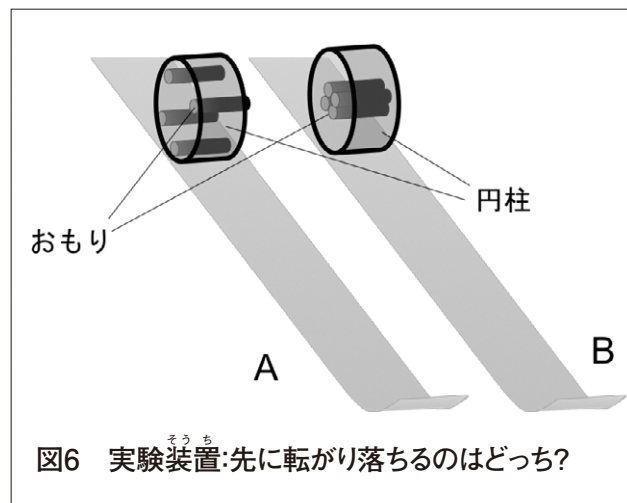


図6 実験装置:先に転がり落ちるのはどっち?

図6のように、中におもりを仕込んだ二つの円柱を坂道で転がし、落ちる速さを比べます。二つの円柱は中のおもりの数が同じなので、全体の重さは同じですが、おもりの配置が異なるため、転がりやすさが異なります。回転する物は、おもりが回転軸から離れているより、回転軸に近い方が回転しやすいので、図の場合は中心におもりが集まっているBの方が、早くゴールします。

すべり台で滑るとき、何の影響で早さに違いが出たのか、考えてみると面白いのです。

2.3. シーソー

シーソーは、長い板の中心に支え(支点)があって、その両側に人が乗って重さ比べをして遊ぶ遊具です。大人と子どもが乗った時など、釣り合いが取れていないと、一方に傾いたまま動かず楽しく遊べないため、乗る場所を選んで釣り合いを取るのが大事です。

同じ重さの人同士の場合は、支点から左右に同じ長さ離れた所に乗れば釣り合いがとれますが、重い人と軽い人が乗る場合は、重い人が支点近くに、軽い人が支点から離れて乗ると釣り合います。いずれの場合も、釣り合いが取れていてもすぐにどちらかに傾いてしまうので、バランスを取るために前後に動いたり、わざと上下に動かしたりして楽しみます。

「実験装置：いろいろなシーソー」では、支点の高さを変えた3種類のシーソーを紹介します(図7)。

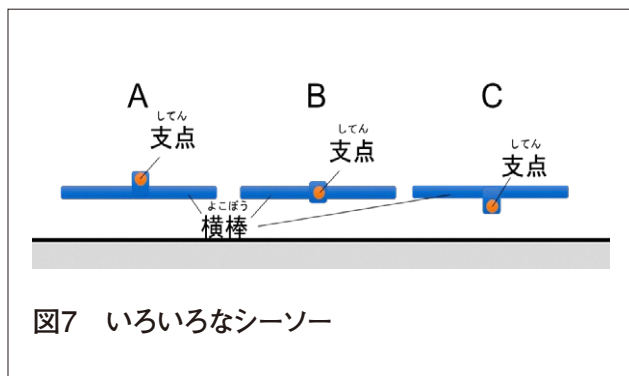


図7 いろいろなシーソー

3つのシーソーを動かしてみると、それぞれ異なる反応をします。左のシーソーAは、少し傾けて手を離しても、すぐに水平に戻ります。真ん中のシーソーBは、傾けるとその位置でそのまま止まります。右のシーソーCは、傾けた方向にそのまま倒れ、床にぶつかるまで動きます。

この動きの違いは、支点とシーソーの重さの中心(重心)の位置関係の違いにあります。このシーソーの重心は横棒の中心にありますが、横棒の上に支点がある左のシーソーAでは支点の真下に重心が移動しようとするため、傾けたことで重心がわずかながら左右にずれても、元に戻ろうとします。真ん中のシーソーBは、重心が支点と同じところにあり、どのような角度でも釣り合いが取れるので、どのような傾きでも静止できます。右のシーソーCは、重心が支点の真上にあれば釣り合いますが、少しでも傾くと重心の位置が支点の真上からずれてしまいます。するとAのように支点の真下に重心が移動しようとするため、ずれた側にそのまま回転してしまいます。床があるため、そこでぶつかりシーソーは止まりますが、もし床がなければそのまま回転し、左のシーソーAと同じ状態になったところで止まります。

遊具のシーソーは右のシーソーCの状態、わざと不安定な状態とし、その動きを楽しめるようにしているのです。一方で、左のシーソーAは安定した状態になっているため、天秤やさおばかりで使われています。

2.4. 振り子・ブランコ

振り子は、おもりをひもや棒で吊して、左右に振れるようにしたものです。おもりの代わりにその位置に人が乗れるようにした物がブランコです。振

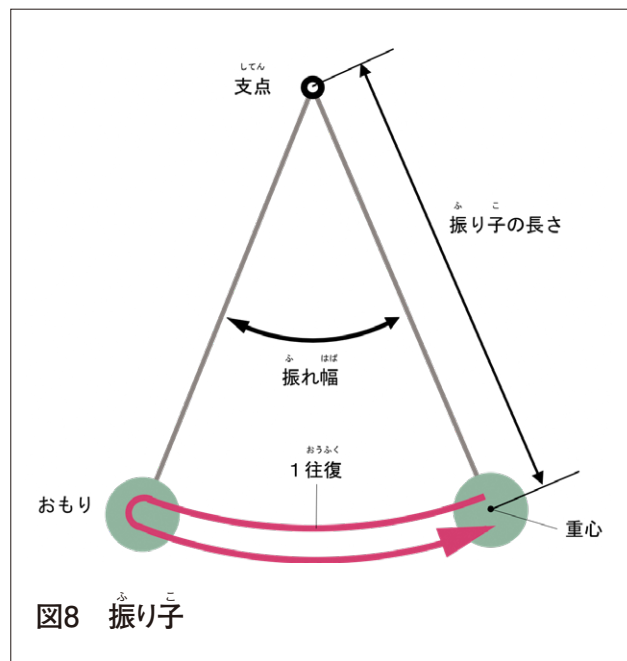


図8 振り子

りが傾くと、重力によって戻るのが働き、ゆれ続けることができます。

振り子の1往復する時間は、振り子の長さによって変わり、長さが長いほど1往復する時間は長くなります。しかしおもりの重さや振れ幅によっては変わりません(図8)。

ところが実際には、親子でブランコにそれぞれ乗って、同時にゆらし始めても、少しずつゆれがズレていきます。普通、体の大きい親の方が早いペースで揺れます。ブランコを取り替えても早く揺れるのは親の方。同じブランコなのになぜでしょうか。

振り子が1往復する時間は、振り子の長さで変わると書きましたが、その振り子の長さとは、ひもの長さではなく、支点からおもりの重心までの距離です。ブランコの場合、おもりの役割は人の体です。大人の方が体が大きく座高が高いので、体の重心も子どもに比べて高い位置にあります。そのため、ブランコのひもの長さは同じでも、おもりである体の重心の位置が高い大人の方が短い振り子になっており、大人の方が早いペースで揺れるのです。ブランコに立った時と座った時で揺れ方が違うのも同じ理由で、立った時の方が体の重心が上になるので、早く揺れます。

この様子を実験する展示が「実験装置：親子でブランコ」です。

また、「実験装置：振り子スネーク」は、長さが少しずつ違う振り子を十数個並べて、同時にゆらしてその動きを楽しむ装置です。

振り子ウェーブとも呼ばれますが、私がこの展示を2008年に初めて見たエクスプロラトリウムというアメリカの科学館では、Pendulum Snake（ペンデュラム スネーク）という名前でしたので（図9）、ここでは振り子スネークと呼びます。

振り子スネークを、例えば最も長い振り子が30秒で15往復し、隣の振り子は少し短くして30秒で16往復、その隣は17往復、のようにしていき、一番短い10個目が30秒で24往復のように調整したとします。これらの振り子を一齐にゆらし始めると、少しずつ揺れるタイミングがズレていき、全体としてへビの様にうねうねと動くようになります。ゆらし始めから15秒が経つと、偶数番目の振り子は往復してスタート位置に戻っていますが、奇数番目の振り子はスタート位置のちょうど反対側にあり、全体としては振り子のおもりが2列に並ぶ瞬間ができます。

さらに時間が進みゆらし始めから30秒経つと、すべての振り子がスタート位置に戻り、一直線になります。その後はこの30秒間の動きを繰り返すこととなります。

この振り子スネークの動きを美しくみせ、30秒後にきれいに一直線に並ばせるには、振り子の長さを正確に調整する必要があります。この調整のため、一般的にはひもの長さを調整するのですが、「親子でブランコ」で紹介したとおり、重心の位置

を変えることでも振り子の長さを変えたこととなります。当館展示の振り子スネークには、ひもの長さを変えずに重心の位置を調整する仕掛けとして、おもり内部にネジを仕込み、そのネジを上下させることで重心位置を微調整する機構をつけました。なお、昔ながらの振り子を使った時計にも、正確なペースで揺れる必要があるため、振り子に重心位置の調節機構があります。

3. 第二の視点 地球を離れて見ると、重力は…

地球を飛び出して考えてみると、重力の新しい姿が見えてきます。

私たちは地球が丸いことを知っています。地球全体のことを考えてみれば、重力の向きは地球の中心に向かっていていることに気づきます。さらに地球を離れて月に行くと、月面上では地球上より重力は弱くなり、太陽に行くと重力は強くなります。このように、重力は場所によって向きも大きさも変わるのです。さらに、月や太陽も重力によって地球をひきつけており、お互いに引き合っている力であることがわかります。このような見方をするとき、重力は「万有引力」または単に「引力」と呼ばれます。

「万有引力」の影響は、地上でも気づくことができます。海の満潮や干潮といった現象（潮の満ち引き）は、太陽や月の引力の影響で地球表面に海水の偏りができるため起こります。そして地球が自転することで、その偏りが周期的な海水面の上下として見られます。

もう少し詳しく説明しましょう。なお、海水の偏りを作る影響は月の引力の方が大きいのですが、仕組みを考えやすい太陽の引力による影響を、先に説明します。

地球は、太陽からの引力を受けながら太陽の周りを回っています。公転軌道上にある地球の中心では、太陽の引力と公転による遠心力は釣り合っています（図10）。

天体の引力は、その天体に近いほど強くなります。太陽に向いた側の地球の表面では、地球の中心より太陽に近い分、わずかに太陽の引力が強くなります。一方、太陽と反対側の面は、遠い分だけ太陽からの引力が弱くなり、遠心力が勝ります。

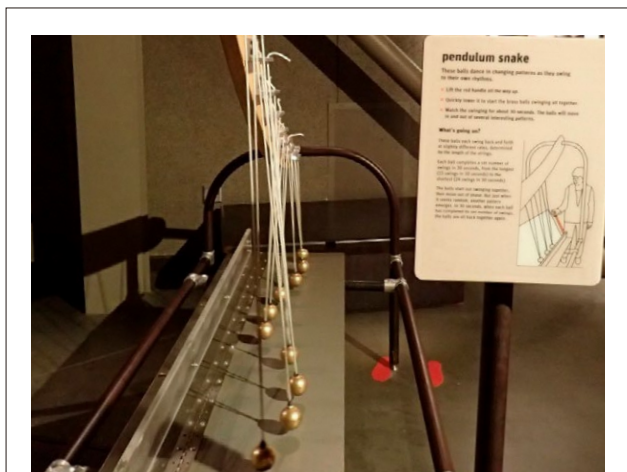


図9 エクスプロラトリウムのPendulum Snake

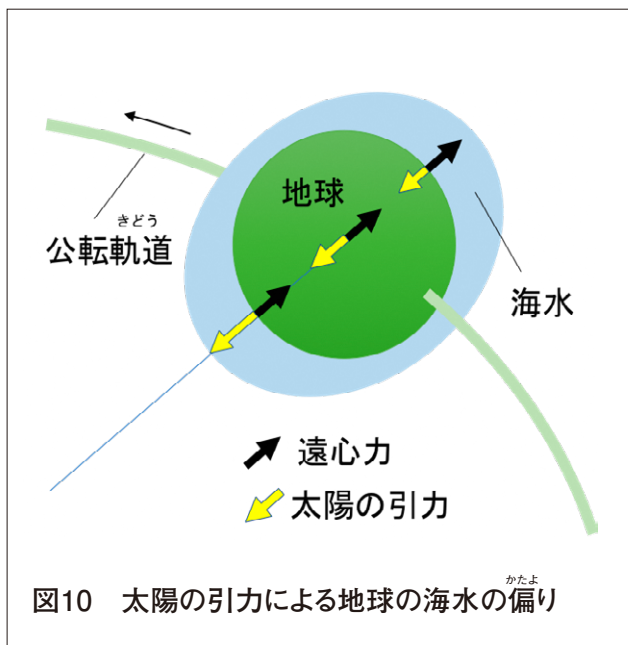


図10 太陽の引力による地球の海水の偏り

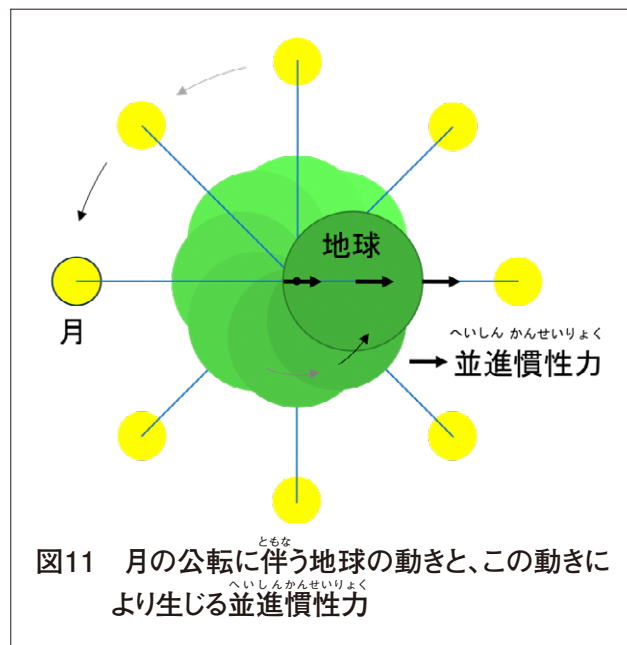


図11 月の公転に伴う地球の動きと、この動きにより生じる並進慣性力

その結果、全体として、地球表面では太陽を向いた面と反対側の面の海面が盛り上がるようになります。

月の引力による影響も同様です。月に近い側の地球の表面では月に近い分だけ引力が強く、反対側の面では遠い分だけ弱くなります。

月の引力と釣り合う遠心力のような力は、図11のような地球の動きによって生じています。

この力と月の引力により、結果として太陽の場合と同じように、月に向けた面と反対側の面の海面が盛り上がります。

実際の潮の満ち引きでは、太陽の引力と月の引力がともに作用し、月と太陽が同じ方向か反対方向にあるときには大きな満潮（大潮）に、月と太陽が地球から見て直角の位置にあるときは小さな満潮（小潮）になります。さらにそこに、地球の自転や、海岸や海底の地形などの影響が加わります。

4. 第三の視点 究極に重い天体だと、重力は…

地球や月、太陽など天体によって重力の大きさは異なります。また、天体までの距離でも重力の大きさは変わります。

— コラム 地上での重力と万有引力 —

第一の視点での重力には、地球による万有引力に加えて、地球の自転による遠心力の影響がわずかながら含まれています。

家庭用のキッチンスケールや体重計のような秤の精度では違いはわかりませんが、科学実験に使うような正確な秤を使うと、富山で体重が50kg ちょうどの人が同じ秤を使って札幌で体重を量ると 50.03kg になり、沖縄で量ると 49.96kg になります。これは、その人が太ったり痩せたりしたわけではなく、地球の自転による遠心力の違いが大きな理由です。遠心力は自転軸からの距

離が遠くなるほど大きくなるので、北極や南極よりも赤道上の方が重力が小さくなります。札幌よりも、富山、富山よりも沖縄の方が体重計の値が小さくなるのはこのためです。また遠心力以外にも、量る地点の地下の密度構造の違いや、時間的に向きが変わる月や太陽の引力によっても、地上で計測される重力の大きさは変化します。

ただし、「天体同士の間で働く重力」のように、天体の自転を考慮しなくて良い場合には、重力という言葉は万有引力と同じ意味で使われます。

太陽のすぐ近くや太陽より重たい星の周りなど、重力が非常に大きくなる場所では、万有引力では説明できない現象があります。その一つが、天体の重力によって光が曲げられる現象（重力レンズ）です。

この現象を説明するには、重力は物体同士が互いに引き合っているのではなく、物体が空間を曲げ、その空間の曲がり方が重力を引き起こす、という考え方である「一般相対性理論」が必要になります（第三の視点）。一般相対性理論では、物体の周りの空間は、すり鉢または漏斗のような形にゆがんでいるとされます（図12）。



図12 ブラックホール重力場モデル

そのゆがみの中に別の物体が入ると、すり鉢の中心に引き寄せられる、このような現象が重力の正体であると考えます（正確には、別の物体の周りでも空間がゆがみ、その重ね合わせたゆがみに沿って近づきます）。

物体が動くと、その周りの空間のゆがみも動きます。このゆがみが伝わる速さは光の速さと同じであると考えられています。物体が揺れ動くと、空間のゆがみの動きも光の速さで四方八方に広がっていきます。これが重力波です。宇宙空間を伝わり、重力波は、地球にも到達しています。

こうした空間のゆがみが引き起こす空間の伸び縮みは、日常生活レベルではまったく計測できないほどわずかなものです。しかし、利用するデータの精度が非常に高いものでは影響が出ます。例えば、人工衛星から送られる電波を受信して地球上での

位置を割り出すGPSでは、一般相対性理論による計算をして影響を補正し、正確な位置情報を得ています。

5. まとめ

第一の視点は、16～17世紀のイタリアの科学者ガリレオ・ガリレイが「落体の法則」として発見しました。第二の視点は、17～18世紀のイギリスの科学者アイザック・ニュートンが「万有引力の法則」としてその現象を解明しました。第三の視点は、19～20世紀のドイツ生まれの科学者アルベルト・アインシュタインが「一般相対性理論」として説明しました。

このように、技術が進歩し理論が進展し新しいことが見えてくる度に、新しい法則に塗り替えられてきました。

現在は、宇宙全体が膨張し続けており、そのうえその膨張速度が加速しているという一般相対性理論だけでは説明できない現象が見つかっていません。第四の視点が必要とされているのかもしれない。

きっとそこには、私たちがビックリさせるような世界が広がっているはずです。いま、世界の科学者が新しい理論や法則を産み出そうとしています。

未来には、人類は新しい物理学の世界を見ていることでしょう。皆さんも、その一人になれるかもしれませんよ。

