



医療と物理学

広島工業大学 特任教授 物理学
北 野 保 行

要旨 物理学はわれわれの身の回りに転がる石のように、どこにでもころがっている。と同時に、果てしない夢を見せてくれるロマンでもある。どちらもうまく利用してみると、楽しさが倍増する。少しでも物理学になじみ、自分で判断出来るようになると、ますます物理学に興味を持てるようになる。その第一歩を踏み出すための準備をはじめよう。ここでは、大学や高等学校における「物理学の単位」ではなくて、「物理量の単位」について解説をこころみた。物理学を話すためには、読者に同じ土俵に乗ってもらわねば通じない。話が通じるための第一歩が単位の話である。世界条約である SI 単位系における基本単位は7つあるが、そのうちの、主な単位である、長さ、時間、質量について話をする。これらにまつわる事、および力について考えた。また、重さ（重量）と質量の相違についても述べる。物理学における「はじめの一歩」を踏み出だした。

はじめに

「医療と物理学」と題して話題提供します。シリーズになるかどうかは、私の努力次第です。看護学校やリハビリテーション学院で、物理学の講義をした経験があります。その時の講義ノートがベースにあります。

物理学は、医療・看護・リハビリテーションに限定して、特別な物理学があるわけではありません。看護やリハビリテーションを志す人たちに、その考え方になじんでもらい、現場に起こるさまざまな問題に対して、合理的に対処する力を身に付けてもらうことが目的です。従って、具体的な対処方法の一つ一つ学ぶものではありません。ここでは、自分で対処する方法を見いだす能力を養うことが求められます。お話しの題材に身近なものを選ぶことが私に科せられた任務です。現場で直接出くわすいろいろな場面で、それにまつわる現象を多く思い起こさせるような題材を選ばねばなりません。

自分の血圧を測ってみてください。普通に測るだけでなく、万歳して測るとどれだけ下がるか、腕を下げるとどれだけ上がるか試してください。血圧は風呂の中の水圧と同じように、深くなればなるほど圧力が上がります。連通管で山を越えて流れ出る水も、残り湯を洗濯機に吸い上げるときも、同じように考えが繋がると思っています。車いすを押す側と乗る側の2手に分かれて、動き始める時、止まるとき、曲がるときに、どんな力を出し、どんな力を受けるか。その体験から学ぶ運動の物理学は、日頃の経験がけして物理学は日常から離れたものでないことを教えてくれます。どんなところにも、どんなときにも物理学が顔をのぞかせます。そんな時に、「あっ、これかな?」と思い当たると楽しくなります。

物理学の魅力はそれだけではありません。自然を支配する法則はどのようなものか。そしてその法則がどのようにして解き明かされてきたか、ロマンを語ることも忘れてはいけません。人として生きるための糧を養うのも物理学の役目です。

テーマとして取り上げなければならないことは、力学、電磁気学、熱統計力学、量子力学、原子物理学、物質物理学と、かたくるしい名前が続きますが、どの分野を取っていても、われわれの日常生活に関係

のないものはありません。物理学は進歩し、完成した部分が非常に多くなりました。身の回りのものを題材として、できるかぎり噛み砕いて、わかりやすく、読みやすくしたいと思います。次を読みたくないように努力しましょう。

ここでは主に、力学からはじまりますが、物理学を学ぶための基礎となる「単位」の話がおもな内容です。物理学への道のきっかけとして、星の話から始めますが、皆様の過酷な仕事の合間に、ほっとしながら読み始めて下さい。一服の清涼剤の役目ができれば嬉しく思います。では、始めましょう。

1. 黄道12星座

暗い夜空をみあげると星がすきまなくぎっちりとちりばめられています。古代の人々はこの星たちをみて想像たくましく図形を描きました。乙女の姿を夢見、勇ましく走る動物の姿を思いました。星座は全部で88個組あるそうです。古代ギリシャの天文学者ヒッパルコス（BC190-120頃）は、そのうちの46星座を描き、今もそのまま使われています。数ある星座の中で、昼間太陽の通る道に、夜になると現れる星座があります。それらは毎日少しずつ位置を変えていきます。黄道12星座です。黄道12星座の名前を順に挙げてみましょう。同時に、この星の元に生れたと言われる誕生月と、現在その星座のよく見える時期・時刻を示しました。

黄道12星座の名称	誕生月	現在真南に見える時期・時刻	
おひつじ座（牡羊）	3月～4月	11月	午前0時
おうし座（牡牛）	4月～5月	12月	午前0時
ふたご座（双子）	5月～6月	1月	午前0時
かに座（蟹）	6月～7月	2月	午前0時
しし座（獅子）	7月～8月	3月	午前0時
おとめ座（乙女）	8月～9月	4月	午前0時
てんびん座（天秤）	9月～10月	5月	午前0時
さそり座（蠍）	10月～11月	6月	午前0時
いて座（射手）	11月～12月	7月	午前0時
やぎ座（山羊）	12月～1月	8月	午前0時
みずがめ座（水瓶）	1月～2月	9月	午前0時
うお座（魚）	2月～3月	10月	午前0時

黄道12星座と太陽と地球の位置関係はどうなっているのでしょうか。図1に示しました¹⁾。太陽を中心にして地球は1年に1回公転しています。その道を黄道と呼びます。黄道とはもともと地球から見て、

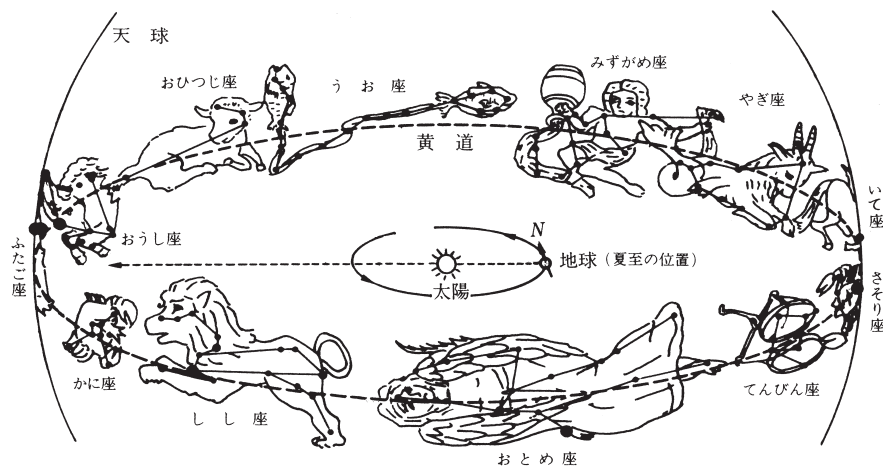


図1 黄道12星座の配置図 太陽 地球 地軸 との関係¹⁾

このことにはじめて気がついたのは、今から2000年以上前のことです。前出のヒッパルコスです。図2をもう一度見てください。ヒッパルコスはこの図で、春分点が移動していることに気がついたのです。春分点（秋分点）とは、図2の、地球の赤道面と黄道面との交差線（黄道）の方向です。春分点の近くに観測される恒星が移動していることに気がついたのです。おとめ座の星スピカが、約160年前のチモカリスの観測結果と較べて2度東に移動していることを発見したのです。しし座の星レグルス、さそり座のβ星の位置も測定されていて、同じように移動しています。これら三つの星のお互いの位置関係は変わっていません。これらの測定値を表1にまとめておきます²⁾。観測者名、年代、観測と観測の間の年数も付け加えておきました。



表 1 春分点からみた恒星の位置変化観測の歴史²⁾

観測者	年代	間隔(年)	スピカ(乙女座)		β (さそり座)		レグルス(しし座)	
			赤経(度)	赤緯(度)	赤経(度)	赤緯(度)	赤経(度)	赤緯(度)
チモカリス	BC293	166	172.5	1.4	212.0	1.3		21.3
ヒッパルコス	BC127		174.3	0.6			119.8	20.7
メネラウス	AD98	40	176.3		215.9			
プトレマイオス	AD138		176.5	0.5	216.3		122.5	19.8
アル・バッターニ	AD1529	1391			227.8		134.0	
現代	AD1900	371	200.0	-10.6	240.0	-19.5	150.8	12.5

表 1 にはありませんが、15世紀の終わりごろ、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエ（1546-1601）が同様な測定を行い、春分点が移動していることを再確認しました。そして、古代ギリシャにおける測定値と比較して、地球の地軸がその方向を変えており、25800年の周期で元に戻るだろうと結論しました。

この現象の起こる理由の解明は、ニュートン（1642-1727）によって行われました。ティコ・ブラーエの約100年後です。ニュートンは「地球は完全な球ではなく扁平で、赤道半径の方が極半径よりも長い」からに違いないと考えたのです。もちろんニュートンは自身が創造した運動原理（運動の法則と呼ばれている）に基づいて計算したのです。さらに、ニュートンの約100年後に、探検家が地球の形を実際に測定し、その事実を確かめました。

現在の測定結果を示します³⁾。

赤道半径 = 6378137 m (1)

極半径 = 6356752 m (2)

平均半径 = 6367 km (3)

赤道半径が極までの距離にくらべて約21km 長いのです。地球の赤道に沿う1周の長さ、いわば地球の胴回りが太くなっています。この地球の形を「地球のメタボ」と呼ばせて下さい。およそ2000年かけた不思議な天体の行動が、「地球のメタボ」による、紛れもない物理現象であることが、ニュートンによって解き明かされたのです。

地球は「地球メタボ」のために、地軸の方向が変化します。赤道面の傾きが徐々に変化して行くのです。自転の回転軸が図2の上部の点線のように変わって行きます。つまり、図の春分点の方向が変化して行くのです。このように回転の軸が変化する運動を「歳差運動」と呼んでいます。「すりこぎ運動」ともいいます。すり鉢とすりこぎで、ごまをするときの棒の動き方に似ているからです。地球の「すりこぎ運動」がなぜ起こるかは、少しやっかいな計算が必要です。しかし、その原因は、地球の形が球からずれて、胴回りが「メタボ」に太っているからであることははっきりしています。この太り部分が太陽から受ける万有引力の計算を複雑にしているのです。

コマを回して床の上を走らせると、軸が斜めになって円を描いて走り回ります。同時にコマの軸の方向が変わります。これが「すりこぎ運動」です。コマが床を走って一周するのと、軸の「すりこぎ運動」の周期とはほぼ同じです。ごまをするとき、棒の回転と棒の向きの回転は同じ周期です（すりこぎではめん棒自身は自転しない）。ところが地球の場合には、一年で太陽の周りを一周しますが、自転軸の「すりこぎ運動」の周期は途方もなく長く、およそ26000年なのです。

地球の自転軸の方向が変化して、すりこぎ運動をすることによって、BC4000年ごろには、りゅう座の α 星の方向を向いていましたが、現在はこぐま座の北極星の方向を向いています。AD8400年ごろにはケフェウス座の α 星の方向を向き、AD14900年ごろはベガ座の方向となります。そして、今から約26000年後には再び北極星の方向に戻ってくるのです。

3. 再び黄道12星座

地球のすりこぎ運動によって、1.の「黄道12星座」はどうなるでしょう。今から約13000年後のことを想像してみましょう。図1で、地球がこの位置にあるとき、地軸の傾きがちょうど逆になっているのです。自転軸の左上から右下への傾きが、右上から左下への傾きに変わっているはずですが、その時北半球は冬です。太陽は南半球を真上から照らしています。1月だとしましょう。現在太陽の方向にあって見えないはずの星座が、夜になれば現れてきてよく見えるようになっているでしょう。そしてさらに13000年が経過すると、また現在のように元に戻るでしょう。もちろん星座がお互いの位置を変えずに、今の通りであることが前提です。

黄道12星座の星占いは4～5千年昔に始まったと言われています。そうだとすれば、いまではすでに少しずれているのではないのでしょうか⁴⁾。

1.に挙げた星座の名称、誕生月、現在真南に見える時期・時刻に示された見える時期はずれていないのでしょうか。誕生月が3～4月のおひつじ座は、この時期からちょうど半年後、つまり9～10月に見える位置にあるはずですが、ところが現在では11月に見えているのですから、2ヶ月分食い違っています。一周のずれが26000年ですから、2ヶ月分の狂い、つまり2/12週のずれ D は、

$$D = 26000 \times \frac{2}{12} = 4333 \text{年} \quad (4)$$

になります。このことから、星占いが始まってからすでに4300年以上経過していることになります。星占いの伝説は紀元前2～3千年までさかのぼると言われています。よく一致すると言えます。

4. 万有引力の法則

「二個の物体は必ず引き合う」これがニュートンの発見した「万有引力の法則」です。ニュートンは、「リンゴが木から落ちる」のを見て思いついたのでしょうか。決してそんな簡単なものではありません。ニュートンがその発見者として今なおその地位を保っている理由は、引力の大きさを式で表したこと、そしてその式が今なお正しいことです。

なぜ、二つの物体は引き合うのか。この質問に対する答はありません。ただ、そうなっているだけです。物理学は理由を問う学問ではありません。どのようなになっているかを問い、こうなっているのだと答える学問です。ただし、その答が数学的でなければいけないし、例外なく、全てに当てはまらなければなりません。情緒的、感情的、文学的であってははいけません。客観的であるべきで、誰が計算しても同じ結論にならねばなりません。ニュートンは引力について、どうなっているかをみごとに答えたのであります。

すこしばかり式を使ってみましょう。文字や数値を使って式を書くことにします。万有引力の大きさ F は、引き合う二つの物体の質量 m および M に比例し、物体間の距離 r の二乗に反比例します。このことを式にすると、次のようになります。

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (5)$$

ここで、比例定数 G は、万有引力定数と呼ばれ、値は³⁾

$$G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ [m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

式(5)の力を表す単位は、「ニュートン」であり、[N]と記述します。ニュートンの偉業をたたえているのです。ここでは質量を[kg]キログラム、長さを[m]メートル、時間を[s]秒で表すことに決めています。これは1960年の国際会議で決めたSI単位系と呼ばれる単位系で、日本もこの単位系を使

用する国際条約に加盟し批准しています。

ここで、小文字の m が違った意味で二度出てきてしまいました。質量の m と長さの単位 $[m]$ です。良くないことです。高等学校の物理学の教科書も含め、全ての教科書がこのようになっています。よく見ると、この2つの m は僅かに異なっています。質量の m はイタリック体で印刷され、単位の m は普通の自体で印刷されています。単位の時には $[\]$ に囲まれていることが多いのですが。

物理学の世界では、全ての物理量をイタリック体で表すことにしています。単位は普通の自体で記述する。こうして区別しているつもりでいるのですが、言い訳に過ぎません。高等学校の教科書でもそうしています。これで容赦してもらえとは思えませんが、ここではこの方法を踏襲させていただきます。ただし、手書きの時はなかなか区別が困難です。だから単位には $[\]$ を付けたくなくなってしまうのですが、やたら $[\]$ をつけると煩わしくなります。今後、幸いこれは印刷されますので、物理量はイタリック体で記述します。単位は必要に応じて、 $[\]$ で囲むことにします。

5. 重さ（重力）と質量

この節では、重さ（重力）と質量の区別をはっきりさせておきましょう。あなたは自分の重さを感じていますか？ もし感じていない人があれば、逆立ちをしてみてください。鉄棒にぶら下がっても結構です。1分もすれば腕は痛くなってきます。重さ（重力）のせいです。がんばって手は力を出しているのです。足が重さつまり重力をあまり感じないのは、単に足が丈夫だからです。逆立ちをしたときだけ重くなったとは考えられません。重さは力そのものです。

重さと質量の違いを簡単に言えば次の通りです。物体の「重さ」とは、地球の表面で、その物体を支えるために出さねばならない「力の大きさ」であります。他方、物体の「質量」は、その物体を構成する「物質の量」のことです。

最近、宇宙船の若田さんを見る機会が増えています。若田さんは、ふわふわ浮いていて、「重さ」はありません。若田さんの「重さ」はゼロです。しかし、若田さん自身は消えてなくなったわけではありません。物質としての若田さんは存在し、その分量も変わらないでしょう。そのかわらない分量が「質量」なのです。

しばらく宇宙船に滞在した若田さんが地上に戻り、若田さんにも重さが回復したにちがいません。いすに座っておしりが痛いと言われたとか。足だけでなくおしりも重さを支える役目をしていたのです。

6. 質量の単位と力の単位

「質量」とは5.で述べたように、「物質の量」と考えるとよいでしょう。混合物でも、単一物質でも何でもよいのです。「質量」つまり「物質の量」の単位が $[kg]$ です。「物質の量」の基準となる1kgの分量は、フランスの国際度量衡局に保管された「国際キログラム原器」の量で決められています。この原器の複製が作られ、世界中に配られています。日本にも、1889年に、第6番複製が配布されました。つくばの産業技術総合研究所に保管されています。この「日本キログラム原器」は「国際キログラム原器」より0.170mgだけ質量が大きく、1.000000170kgです⁵⁾。

「質量」が物質の量であり、kgがその単位だとすると、「力」や「重さ」の単位はどうしたらよいでしょう。今まで力の単位だと信じてきた「kgキログラム」を「質量」の単位として取られてしまいました。50年以上も昔ですが、高等学校の生徒だった頃、「力」の単位は $[kg \text{ 重}]$ とか $[kgw]$ と習いました。質量の単位 $[kg]$ に、重とか w をひっつけて、質量の単位と区別したのです。今の高校生はすでに力の単位は $[ニュートン]$ $[N]$ で習っています。 $[kg \text{ 重}]$ とか $[kgw]$ は何のことか分かりません。分からないままでよいと思います。

繰り返しますが、現在、力の単位は $[N]$ ニュートンを使います。地球上で物体の重力は、質量の値 m に9.8をかけるとよいのです。単位が $[N]$ となります。この値9.8は、地球上での「重力の加速度」と呼ばれており、小文字の g を使って代用することが一般的です。

まとめると、質量 m [kg] の物体の重さ（重力）は、 mg [N] です。ここで、 g は 9.8 [m/s²]。式で書いておきましょう。

$$\text{質量 } m \text{ [kg] の物体の重さ (重力) } = mg = m \times 9.8 \text{ [N]} \quad (7)$$

$$\text{質量が } 70 \text{ kg の人の重さ (体重) } = 70 \times 9.8 = 686 \text{ [N]} \quad (8)$$

「太ってしまって、体重が70kgを超えた」と表現します。昔でも重さを kg のかわりに「kg 重」とか「kgw」を使う人はいませんでした。また、今でも、「686[N] を超えた」などと言う人はいません。どんなことがあっても言いたくありません。日常でこの状態をどうすればよいか、良いアイデアはありません。力を [N] の単位にするにも大変な困難が伴います。今後どのように展開されるか予想もつきません。

7. 力 [N] から派生する物理量の単位 I：圧力

力の単位 [N] が気に入らなくても、力から派生する物理量は、すべて [ニュートン N] を基礎にしています。たとえば気圧です。圧力は面積当たりの力です。これは血圧に通じます。1 平方メートル [m²] 当たりの力 [N] で表す圧力の単位は、パスカル [Pa] です。すでになじみの単位になっています。台風がやってくると、ヘクトパスカル hPa がテレビから流れます。SI 単位系の普及に大いに役立っています。ヘクトの h は $\times 100$ の意味で、キロの k が $\times 1000$ の意味と同じです。

血圧は、物理量としては圧力です。医療現場では、[Pa] 単位を用いていません。もっぱら、[トール Torr] です。つまり、[mmHg] です。水銀柱を 760 mm だけ押し上げる圧力を 1 気圧 (101300 Pa = 1013 hPa) としています。血圧は何 mm だけ水銀を持ち上げられるか、その数値で表しています。水銀の密度と重力加速度 $g = 9.8$ が入った数値になっています。この単位は、[気圧 atom] でも [Pa] でもありません。[トール Torr] です。圧力の単位も前途多難です。単位を変更して、お医者さんが患者の容態を間違えたら大変です。

血圧が 150 torr は、ヘクトパスカルではどんな数値になるのでしょうか。1 気圧 atom の換算と一緒に、その関係を示しておきます。

$$760 \text{ torr} = 1013 \text{ hPa} = 1 \text{ atom} \quad (9)$$

$$150 \text{ torr} = 150 \times \frac{1013}{760} = 200 \text{ hPa} \quad (10)$$

われわれは、1 atom (760 torr) 1013 hPa の中で生活しています。ですから血圧 150 torr は、実際には $760 + 150 = 910 \text{ torr}$ の圧力を意味しています。

8. 力 [N] から派生する物理量の単位 II：エネルギー

エネルギーもよく使われる単位です。エネルギーは力と長さのかけ算で決まります。力を [N]、長さを [m] で表して、かけ算するとよいのですが、結果を [J] ジュール と呼ぶことにしました。エネルギーの単位です。このエネルギーを時間 [s] 秒でわり算すると、日常よく使用するワット [W] になります。1 秒当たりのエネルギーを意味し、仕事率と呼ばれています。これもやはり、力の単位 [N] をベースにした単位です。このように、力の単位 [N] を毛嫌いされては大変困った事になってしまうのです。

ワット [W] は、電気分野では電力と呼ばれています。力学と電磁気学がここでつながります。電磁気学の実用単位、ボルト（電圧）、アンペア（電流）、クーロン（電気量）に直接つながります。SI 単位系の最もすばらしいところです。私と同世代人で、電磁気学の単位に悩んだ人は数多くいます。その悩みは完全に解消されています。医療系の物理学の新しい教科書に、「cgsesu 有理単位……」なる記述を見つけたときには愕然としました。こんな単位系は SI 単位系を使うことで全く必要がなくなりました。

日常使われているエネルギーの単位に、**キロカロリー kcal** があります。これは、水1kgを温度1K (1℃) だけ上げるのに必要なエネルギーです。SI 単位系ではないが、よく使われている単位として認められています。1 kcal は、**4.18kJ** という関係があります。ジュールが実験で見つけた換算率です。その功績をたたえて、エネルギーの単位をジュールと呼び、[J] と記述します。

9. 気体の状態方程式と気体定数 R

高等学校の化学で、「**気体の状態方程式**」は今ではどのような単位で習うのでしょうか。「ピーヴィーイコールエヌアルティー」と覚えたあの式のことです。ちゃんと書いておきましょう。

$$PV=nRT \quad (11)$$

ここで、 P は圧力、 V は体積、 n はモル数（気体の分量）[mol]、 R は気体定数と呼ばれる定数、 T は絶対温度 [K] です。この式の単位を考えましょう。モル数と絶対温度の単位は決まっています。圧力や体積の単位をどうするかによって、気体定数 R の値は変わります。

いわゆる「**標準状態**」つまり、1 気圧 0℃ (273K) で、気体の体積は22.4ℓ です。この値を式 (11) に代入すると、 $1 \times 22.4 = 1 \times R \times 273$ となり、気体定数 R は次式です。

$$R = 22.4/273 = 0.082 \text{ [ℓ 気圧/mol K]} \quad (12)$$

この定数の単位は、[リットルキアツパーモル (ド) ケー]、[ℓ 気圧/mol K] です。

この単位は、SI 単位系とはずいぶん遠い存在です。SI 単位系で圧力は [Pa]、体積は [m³] ですから、「標準状態」の値を式 (11) に代入すると、 $101300 \times 0.0224 = 1 \times R \times 273$ となり、「気体定数」 R は、

$$R = 8.31 \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol K]} = 8.31 \text{ [J/mol K]} \quad (13)$$

となります。単位の [] の中の分子は、 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 = (\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$ ですから分子はエネルギーの単位となり、1mol の気体が持つ1k 当りのエネルギーを意味します。高等学校の物理ではこの値を習っているようです。

10. 重力加速度 $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ 計算の準備

質量 $m \text{ [kg]}$ のあなたは、地球上で $9.8m \text{ [N]}$ の重さになることを 6. で述べました。式 (7) です。地球上のすべての物体の重さは、その質量に9.8を乗ずると、[N] 単位で求めることができます。この9.8 という数値はどこから来た数値でしょうか。導きだしてみましょう。

重さの原因は万有引力です。4. の万有引力の法則の章の式 (5) を使って具体的に計算してみましょう。大法則をあなたと地球に当てはめようと言うのです。気持ちのよいものです。あなたは少し恐れ多いと思っているかもしれません。しかし、物理学の法則はどんな物体にも平等に当てはまるのです。自然の法則は、その大きさや美しさに媚びることはありません。自信を持って当てはめてみましょう。式(5)をもう一度ここに書きましょう。

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (5)$$

式 (5) の中に使われている文字に意味をあたえましょう。私の質量を $m \text{ [kg]}$ 、地球の質量を $M \text{ [kg]}$ とします。 M の値はデータブックの世話になりましょう³⁾。

$$M = 5.974 \times 10^{24} \text{ kg} \quad (14)$$

次に、二物体間の距離 r は何 [m] でしょうか。つまり、あなたと地球はどれだけ離れているかを知る必要があります。**あなたと地球との距離**はいったいいくらでしょうか。どうすれば分かるでしょうか。すぐ足の下は土は地球です。あちらの山も向こうの海も地球です。それだけではありません。北極も南極も、アメリカも、裏側のブラジルも全部地球であります。こんな場合どうすればよいか。途方に暮れてしまいます。こんなことに答を与えてくれるのは**数学**なのです。数学がちゃんと教えてくれるのです。

数学的に証明されていることがあります。「大きさを考慮すべき場合の万有引力の大きさは、それが完全な球形ならその**重心**に、全ての質量が**集中**していると考えてよい」というのです。実際の地球はこの条件にほとんど当てはまります。結局、地球の中心に全ての質量が集中しているとしてよいのです。あなたと地球との距離は**地球の半径**としてよいのです。

地球の半径 r を、式 (1) と (2) の平均値、式 (3) としましょう。

$$r = \frac{6378137 + 6356752}{2} = 6367445 \text{ m} = 6367 \text{ km} \quad (3)$$

この値があなたと地球との距離です。地球が、完全な球形からのずれがわずかである、として万有引力を計算しても本質を見誤ることはありません。少しばかりのずれは、**1. 2. 3.**でお話しした「地球メタボ」であり、地球の自転軸の変化につながっているのです。何ごともおろそかにすることはできません。

11. 重力加速度 $g = 9.8 [\text{m/s}^2]$ の計算

万有引力の式 (5) に、**10.**で求めた値を代入して、あなたと地球の間に働く万有引力の大きさを計算しましょう。ここで、使う式と数値を整理して再録しましょう。

万有引力の大きさ F の式

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (5)$$

$$\text{万有引力定数 } G = 6.674 \times 10^{-11} [\text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}] \quad (6)$$

$$\text{地球の質量 } M = 5.974 \times 10^{24} \text{ kg} \quad (14)$$

$$\text{地球の半径 } r = 6367 \text{ km} = 6.367 \times 10^6 \text{ m} \quad (3)$$

これらを代入しましょう。ここで、あなたの質量だけ $m [\text{kg}]$ のまま残しておきましょう。地球上の何を当てはめてもよいのですから。

$$F = \frac{6.674 \times 10^{-11} \times 5.974 \times 10^{24}}{(6.367 \times 10^6)^2} m = \frac{6.674 \times 5.974 \times 10^{13}}{6.367 \times 6.367 \times 10^{12}} m = 9.8 m [\text{N}] \quad (15)$$

ここで m はあなたの質量で単位は [kg] です。9.8 を乗じて単位が [N] の力になります。この9.8が**重力の加速度**で、 g で代用されることが多くあります。

この g の単位は、 $[\text{m/s}^2]$ です。地球上でビルの屋上から落ちる物体は、どんどん早くなります。その時、1秒間に速さが9.8m/sだけ増加することからこのように命名されたのです。

重力加速度 g の値はたいてい9.8と二桁で記述されています。上で行った計算では、地球の質量や半径など、四桁も使っています。にもかかわらず、最後に二桁だけにしてしまうのを不思議に思った人もあるでしょう。それには理由があるのです。この値の実測値が地球の緯度とともに変わるからです。変わる理由は主に2つあって、ひとつは、「地球のメタボ」のために、地表から中心までの**距離**が緯度とともに変わるからです。他の一つは、地球の自転のためです。自転による**遠心力**が緯度によって変わるこ

です。どちらも赤道付近で、 g を小さくするように働きます。北極や南極に近づくほど g の値は大きくなります。表 2 に日本各地の g の値を示します³⁾。

12. 長さの単位 メートル m の起源

SI 単位系における長さの単位はメートル meter です。SI 単位系の根幹をなす単位です。このメートルはどのようにしてできたのでしょうか。歴史的には 1 メートルの長さは、われわれの住む地球の大きさを基にして決められたのです。赤道から北極までの長さを 1 万 km とするとしました。およそその 10 分の 1 に当たる 1100km の距離を、地中海の町バルセロナからドーバー海峡の町ダンケルクまで、フランス国内を縦断して、精密に測ってきめました。西暦 1793 年に測り終えました⁵⁾。フランス革命の嵐が吹き荒れる中、国民議会で承認されました。波乱の幕開けでした。

当時、「この長さが 1 メートルです」といういわゆる「メートル原器」を作製し、フランスのパリに保存されていました。しかし今ではその原器は必要なくなっていました。相対性理論の発見によって、長さそのものが、見方によって変化し、いつでも誰にでも同じとは言えなくなってしまったからです。

現在の 1 メートルの長さは、宇宙の最も基礎である光に基づいてきめられています。これまでの 1 メートルの長さとしてきた限り変わらないように決めてあります。この定義を知りたい人は新しい「単位の辞典」で調べてください。

13. 時間の単位 秒 s の起源

時間の単位は、秒で、記号は s で表します。s は second の頭文字であります。野球のセカンドベースと同じように、二番目という意味です。最初の 1/60 は 1 分で、二番目の 1/60 が秒 s です。

時間の基準は、地球の公転による 1 年間の時間と、自転による 1 日を基にして考えられました。一年とは、地球が太陽の周りを 1 周する時間を言いますが、地球が自転して、太陽の南中から次の南中までを 1 日とします。この 1 日を 24 時間に分割し、1 時間を 60 分、さらに 1 分を二度目の 1/60 に分割して、その一つを 1 秒 s としました。

実際の 1 年の長さを日数で数えると、測定値が 365.2422 日になっています。地球が公転して元の位置に戻ったときに、自転の周期と一致せず、ほぼ 1/4 日長くなっています。このずれを補正するため、4 年に 1 回、366 日の年を挟むことにしました。閏年です。西暦の数字が 4 の倍数の年を閏年にと約束されています。そうすると、平均の 1 年間の日数は、次の式で計算されます。

$$1 \text{ 年の平均日数} = \frac{365 \times 3 + 366 \times 1}{4} = 365.25 \text{ 日} \quad (16)$$

この値は、実際の公転の 1 周より少し長くなってしまいます。そのためにもう少しだけ短くする必要があり、100 年に一度閏年をスキップします。西暦が 100 で割り切れる年をそれに当てます。この場合、1 年間の平均日数は次のようになります。

$$1 \text{ 年の平均日数} = \frac{365 \times 76 + 366 \times 24}{100} = 365.24 \text{ 日} \quad (17)$$

この値は実際の公転の周期とくらべると、今度は少し短くなっています。そのため、400 年に 1 度、閏年を復活させます。西暦が 400 で割り切れる年をあてます。そうすれば 1 年間の平均日数は次のようになります。

表 2 日本各地における重力加速度の大きさ³⁾

稚内	9.8064
青森	9.8031
東京 (羽田)	9.7976
名古屋	9.7973
京都	9.7971
広島	9.7966
高知	9.7963
鹿児島	9.7947
西表島	9.7901

$$1 \text{ 年の平均日数} = \frac{365 \times 303 + 366 \times 97}{400} = 365.2425 \text{ 日} \quad (18)$$

この閏年を決めるルールは、**グレゴリオ暦**を基準にして、**西暦1582年**に定められた約束であり、現在も採用されています。**例外の例外**まで決めてあります。直近の例外の例外は西暦2000年にありました。西暦の数が、4で割り切れ、100で割り切れ、しかも400で割り切れます。例外の例外の年だったのです。西暦2000年の正月に、いわゆる「**2000年問題**」というのがありました。すでに使っていた電子計算機が、この閏年の処理を正常にこなせなかったことに関連しているという話を聞きました。真偽のほどは分かりません。しかし分かっていることは、電子計算機に命令を下すのは人間であるということです。計算機が勝手に間違いをしでかすはずはありません。

現在では 秒 s の単位の基準は上記とはすっかり異なり、Cs 原子が放射する光を使って決められています。ここでも光が重要な役割を担っています。もちろんここでも、昔の1秒とできるだけ違わないように決められています。

14. 質量の測り方

質量はどのようにして測るのでしょうか。物質の量を知る方法です。測定方法が2つあります。一つは、地球上で重さを測るのです。体重計に乗って、数値が70kgと出たとしましょう。この場合、その物質の質量は70kgです。これはいつもやっていることで簡単です。「なんだ、同じことではないか」と思わないでください。「重さが70kg」ではなくて「質量が70kg」なのです。「重さは式 (7), (8) から分かるように、 $70 \times 9.8 = 686 \text{ [N]}$ です」この方法で測られた質量を**重力質量**と呼んでいます。

二つ目は多少複雑です。物体に力を作用させて動かしてみ、その動きにくさや動き易さから測る方法です。ここでは力の大きさや、速さや速さの変化を測定する必要があります。質量が増えるとそれだけ動かしづらくなります。同じ速さまで持ってゆくのに、時間や力が必要です。実感できることです。このやり方で測った質量のことを**慣性質量**と呼びます。

この2つの方法で測った質量は、同じ値になることが確認されています。

15. できるだけ太い大根を買おう

大根1本が100円としましょう。できるだけ大きい太い大根、つまり、物質の量、質量の大きい大根を買って帰りたいのが人情です。買い物に行ったあなたはどのようにしましょう。行動を見てみましょう。まず、重いかどうか手にとって、手のひらの上のせて重さを測ります。つぎに、そのまま手を上下に揺らせてみるでしょう。動かして動きにくさを測っているのです。前者は、**重力質量**を測り、後者は、**慣性質量**を測っている。こうしてより物質の量の多い大根を買うのです。本能的行動でしょうか。

おわりに

少しは楽しんで頂けましたでしょうか。

「単位」についてすこし追加しておきます。ここまで、「長さ」メートル [m], 「質量 (物質の量)」キログラム [kg], 時間 秒 [s], の3つについて話しました。他の諸々の単位はこの3つの組合せで、できあがっています。組み合わせとは、かけ算とわり算のことです。足し算や引き算で組み合わせても単位にはなりません。この3つの他に、「電流」の単位、アンペア 記号は [A] をつけ加えさえすれば、始めの3つとともに、電気関係のすべての単位を創り出すことができます。例えば、電圧、電気量 電場 (界), 磁場 (界), 電力などです。すべてこれら4つの組み合わせで作ることができるのです。

SI 単位系ではこの4つの他に、次の3つを基本単位として採用しています。「純粋物質の量」を表す単位 モル [mol] と、温度のパラメーターである「絶対温度」の単位 ケー [K] および「光度」を示す

カンデラ [cd] です。以上の7つを SI 単位系の基本単位と言います。すべての物理量の単位は、この7つの単位の組み合わせで、表すことができるのです。

今ではこの SI 単位系の関する国際条約にほとんどの国が加盟し、批准しています。批准していながら一般に普及していない国はアメリカです。ゴルフやアメフトの盛んな米国ですから、1 ヤードを少し長くして1 メーターとし、競技場をちょっと広くしたらどうでしょう。体も大きくなったことですから大丈夫でしょう。そうすればアメリカも、SI 単位系の普及に大いに寄与してくれるでしょう。実験室にインチねじとミリねじの2種類を用意しなければならないのも大変な負担です。実験装置を分解した時、紛失したねじ（ビス）の代わりを捜すのに苦勞をしたものです。

物理の「ぶの字」が始まらないうちに終わりにになりました。次回もがんばってみます。

参考文献

- 1) 藤原邦男 物理学序論としての力学 東京大学出版会 1984年 9 月28日
- 2) 山本義隆 重力と力学的世界 現代数学社 1981年10月20日
- 3) 国立天文台編 理科年表 2009 丸善株式会社 2008年11月30日
- 4) 沼澤茂美 脇屋奈々代 新版星座神話ガイドブック 誠文堂新光社 2005年 4 月23日
- 5) 高田誠二 単位の進化 原始単位から原子単位へ 講談社学術文庫 2007年 8 月10日