

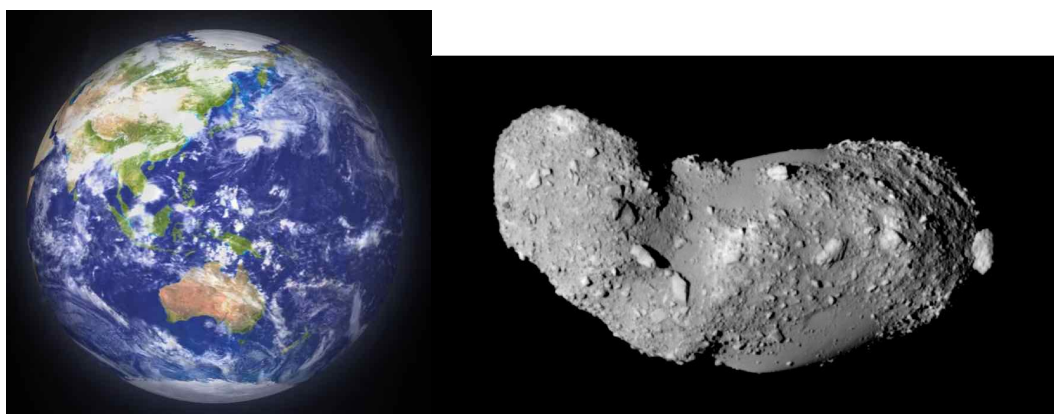
201001-03 星はなぜ丸い

星はなぜ丸いか？

丸くない小惑星

太陽のような恒星も丸いし、地球のような惑星も丸いが、日本の「はやぶさ」が撮った小惑星「イトカワ」の形は丸くはない。宇宙空間に浮かぶ天体には丸いものも、丸くないものもある。気体球である恒星は丸いのが普通であるが、惑星や小惑星という固体の天体にも丸いのも丸くないものもある。月より重い惑星や衛星は大体丸いのをみると、小惑星が丸くないのは重さが小さいことに原因があるようである。

図1：丸い地球と丸くない小惑星イトカワ



重力と圧力

気体は容器がないと直ぐに飛び散ってしまう感じがある。容器がないのに恒星の気体が飛び散らないのは重力で捕えられていて逃げられないからだと理解する。また重力はつねに引力なのにペッチャンコになるまで縮まないのは、縮むと気体の圧力が高まり反発するからだと理解する。すなわち形は重力と圧力の釣り合いで決まっているのである。

ここでもう少し注意深くこの「力の釣り合い」を見てみよう。いま星の中に箱状の小部分を考え、この箱にどんな力が働くかを考えてみる。すると星の中心から星の外に向かう半径方向とそれに垂直な方向とで事情が違っていることに気付く。箱の物体には重力と表面を通じた圧力が働く。星は中心で高温高密度で表面で低温低密だから圧力は表面に向かって減少している。だから箱の上面の圧力は下面の圧力よりわずかに小さく、差し引くと全体として外向きに押されている。この外向きの力とそこより内側の星の物質から受ける重力が釣り合っている。

るのである。

今度は残りの横の面を考えると、重力は互いに打ち消して結局はゼロである。上下左右の周囲から圧力を内向きに受けているのにこの箱が押しつぶされないのは気体の硬さのためである。押しつぶされるのに抵抗するこの力は弾性力と呼ばれる。

気体と固体の差

気体でも固体でもその体積を小さく圧縮すると弾性力が生ずる。他方、体積を大きくしようとするとき気体では無抵抗だが固体では圧縮の場合と同様に弾性力が生ずる。気体の場合は膨張を押し止める外力が働かないとひとりでに広がってしまうが、固体なら外力なしでは広がったり縮んだりしない。これは原子分子がバラバラな粒子として飛び回っている気体と粒子が固く結びついている固体との差として理解される。容器に入れておかないと飛び散ってしまう感じがするのはこのためである。しかし広がった分は隣の小箱から広がってくる分と帳消しになる。ある部分が他の部分の容器の役目をしているようなものである。

表面に蓋はいらないの？

ただこの説明で困まるのは表面の小箱についてである。表面に蓋がないから、気体が逃げ出す不安に襲われる。確かに上に押さえの小箱がなければ気体の粒子は小箱にじっと留まってははいない。全体として小箱の粒子は上昇すると考えられる。しかしどこまでも上昇して星から逃げ出すかというとなんかそんなことはない。重力があるから粒子が達することのできる高さには制限がありそこからまた下に落下してくる。地表で抛り上げたボールが必ず舞い戻ってくるのと同じである。温度で決まる表面の小箱内での粒子の速度は星からの脱出速度よりも小さいから、上昇してもまた舞い戻ってくるのである。固体の地球を覆う薄い空気層に蓋がないのに飛散してしまわないのも同じ理由である。

丸くない星に改造可能か？

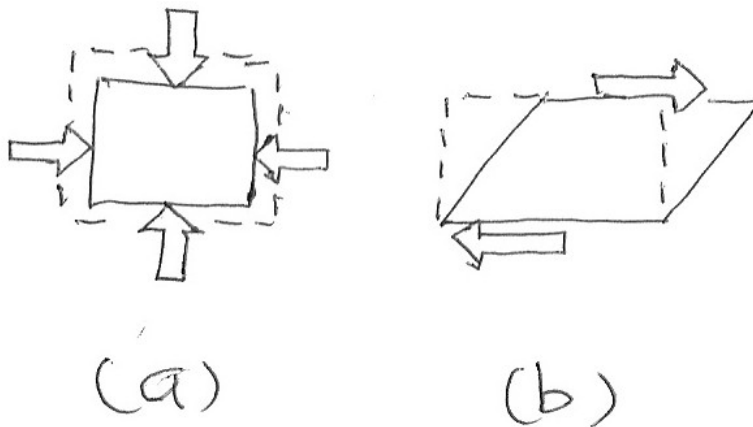
いま丸い気体の星の一部をくえぐって穴を掘りその物質で別のところに盛り土する改造を想像してみる。気体や液体の山が想像できないことから分かるように、こんな改造は不安定ですぐに元に戻るであろう。

しかし地球のような固体の場合は丸い星でも凸凹の星に改造できるように思え

る。地球も完全に丸いわけではない。7千メートルにも及ぶ山があり海がある。だが半径と比較すると凸凹の程度は約1千分の1と小さい。これをもっと大きくする改造は可能か？計算してみると、じつは山の高さは現在のヒマラヤあたりの高さが限界なのである。それ以上に無理に積み上げると底にかかる圧力が大きくなり岩石が液状化して底の物質が横に広がって、元の高さ戻るのである。重力の強さと固体（岩石）の硬さのつり合いが凸凹の程度を決めているのである。丸い地球と丸くない小惑星イトカワの違いの原因はこのあたりにありそうである。宇宙を見て分かるこのような事実を固体の性質として理解する必要があるのである。

体積一定の変形と歪み力

固体の天体が重力で潰れないのは固体の硬さが支えているからだと理解される。これは固体の体積を小さくするように圧縮するには相当な力が要ることから実感できる。この圧縮に反抗する力が固体の硬さである。気体でも体積を圧縮しようとすると反抗力を受ける。これは圧力と呼ばれるが、固体にも圧力があるということである。



では固体と気体の差はなにか？ここで「体積を変える圧縮」というような変形モードに目を向ける必要がある。すなわち「体積を変えない変形」というものも考えられるからである。図のように、固体や気体の小部分の「体積変化」（図の(a)）と「体積一定」（図の(b)）の変形を考えてみる。すると「体積一定」の変形でも固体なら変形をもとに戻す力が生ずるが、気体では何も力が生じないという差に気づく。この変形で生ずる力は歪み力と呼ばれる。ビニールの風船が体

積一定でもいろんな形に変形で出来るのは歪み力がないためである。(実際には薄いビニールという“固体”の歪み力の効果は残るが)

圧力・弾性力・歪み力

体積変化の変形でも、圧縮に対しては気体と固体の差がないが、膨張に対しては気体と固体で差がある。固体なら膨張に対しても引き戻す弾性力が働く。整理すると固体では圧力、弾性力、歪み力の三つがあるが、気体では圧力、一つだけである。変形に抵抗する力という観点からみると、固体と気体の差はこのように特徴づけられる。小部分の表面との関係でいうと、圧力と弾性力は表面に垂直方向に働くが、歪み力は境界面に平行方向に働く、というように分類される。

形状が壊れる

都市のごみ回収車は家庭から出されたごみ袋を圧縮してコンテナ内に押し込んでいく。この場合、ごみ袋の減容化(体積減小)が可能なのは“固体”と“固体”の間にある無数の隙間を詰合せるからである。また生ごみの様に野菜などは水分が多いから脱水が行われている。決して“固体”の圧縮であれだけ縮むのではない。隙間なく固体部分に埋め合わせることで体積が減じたと思われる。けっして固体そのものの体積を減じたのではない。

ただ固体の密度自体は高められないとしても、固体がつくる様々な形状の痕跡が残らないように徹底的に壊すことは出来る。歪み力を上回る力を加えれば形状は壊れる。形状を保っている力が歪み力であるから、歪み力は弾性力・圧力よりは小さいのである。

液状化

気体と固体だけ考えてきたが、中間に液体がある。液体も殆ど体積一定を保って流れが起こる。液体では圧力は固体並みに大きい、弾性力と歪み力は非常に小さい。気体の様に完全にゼロではないが非常に小さい。密度一定で変形するというのが液体のイメージである。

ねっとりした蜂蜜とサラサラ流れる水の差はおおき、自由に変形できるという性質では共通点がある。同じ重力への反応が、水では素早く、蜂蜜では鈍い。これは粘性の差として理解されるだろう。

大きな粘性があっても一定の力が長時間働いておれば、「流れ」は生じるのである

る。あの大きな氷河が実はゆっくりと“流れている”とか、火山のマグマは温度が高いとサラサラだが温度が下がるとねっとりしてゆっくりした流れに変わる事、といった自然現象はこうした物理的な性質で理解される。ある地震の振動に土壌が液状化するという現象もこういうものである。固体と液体は定性的には同性質だが粘性や歪み力の大きさが大きく違うために別物に見えるのである。

地上での最高の山の高さ

地球という天体が丸い理由は次のような仮説的問題を考えてみると納得できる。それは、地球を例え丸くないように成形しても、すぐに元に戻ってしまう、という事実である。成形するとは山をより高く、海をより深くすることである。現在は地球半径の約千分の1の凸凹であった。

重力で縦に押ししても横に広がるというのは、「体積一定」の変形であり、液状化である。この液状化の発想は山の高さの限界を知る上で大事である。岩石の物理的な性質が分かれば、積み上げた岩石の重力で変形に抗する歪み力を突破する高さが求められる。これは約1万mとなる。これとエベレストの7千mは同程度であり、風化で少し低くなったと思えばいい。地球はほぼ精一杯の凸凹の状態にあるのである。

重力の効果

“星がなぜ丸いのか？”の問いは重力とそれで押しつぶされる物質の硬さの比較によって理解されることをみてきた。さらに物質の「硬さ」には圧縮に抵抗する圧力と変形に抵抗する歪み力の二つがあり、気体は圧力だけ、固体だと両方あることをみた。質量が大きくなると重力が大きくなり、物体の歪み力を上回ると丸くなるのであった。このように思わぬことが実は重力で決まっていることが多い。ここでそうした課題を考えてみる。

煙が立ち昇る：重力と燃焼

国際宇宙ステーション ISS 内での宇宙飛行士の無重力体験の光景を目にする機会が増えてきた。一見、重力と関係ないように見えても、重力が組み込まれている地上の現象がある。その典型は燃焼である。「燃焼して煙が立ちのぼる」というのは、上と下の区別があるからであり重力現象である。無重力だと空気のなかでもあのような燃焼は起こらない。早い話が「上下」という方向性がないから、

煙の方向も定まらない。地上の燃焼では、酸素を含む新鮮な空気の供給と燃焼後のガスの排出という二つの機能を重力がつくり上げているのである。

浮力と気象

浮力も重力起源である。重力の差額が上向きになっているのである。加熱された空気が上昇するのもこの浮力が原因である。このために底面が加熱された気体には対流が発生する。透明な空気を突き抜けて太陽光は地面という空気槽の底面を加熱することで対流が発生する。これが地上のさまざまな気象現象に波及していく。重力がないと気象現象はほとんどなくなる。

生物の形と大きさ

「上下」の区別があるものといえば、動物や植物の形がある。人間でも上にある頭には脳という特別なものがあり、下にある足とは差が出ている。なぜ脳を足元におかなかったのか？などという疑問を呈すると実に多くの疑問が発生する。植物でも同じである。この場合は重力以外に太陽光の方向と水のありかの方向の三者が絡んでいそうである。

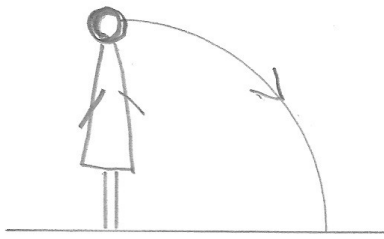
動物や植物のサイズと重力の関係についてもこれまで多くの議論があった。世界には110メートルの巨木もあるらしい。また恐竜時代には10メートル以上の巨体の動物もいたらしい。

ではなぜそれ以上はないのであろう？この問題は「山の高さ」の限界のように物質の「硬さ」と重力の比較できる構造物としての安全性の話だけではない。生きる機能を維持しているのが生物だから、生命機能が生理的に可能でなければならない。たとえば液体で栄養補給を行うのに必要な力であるが、ここにも重力が関わる空気の圧力を通じて一つの目安を与えられる。空気の重さで押し上げることのできる水柱の高さの限界は約10メートルだからである。巨木の高さはこれを超えているから、木の先端への栄養補給は空気による圧力だけでは不十分であり、毛管現象などの特別な仕組みが必要なことを教えている。

生きていく環境

しかし生物のサイズはこうした生理的な機能の物理や化学の原理による考察だけでは不十分であろう。生存している環境が重要である。環境には物理・化学的な環境だけでなく、食物供給や天敵などの生態的な環境も重要である。自然的に

食物があっても、それを他の動物に取られてしまうのでは無いと同じである。生理的にはうまく機能するサイズでも、他からの攻撃に対応できるすばしっこさがなければ生存できない。生態の世界は食うか食われるかの「自然淘汰」「適者生存」の世界である。



人間の背の高さ

生物のサイズの問題は山の高さ限界のように単純ではなさそうである。しかしここで単純な力学の問題で面白いサイズが計算できることを紹介する。これは筆者の『宇宙物理』（岩波書店）に書いたものである。

人間の特徴は二足歩行である。霊長類でも立ったりするが、移動では手をついた移動である。それに比べて人間は極めて不安定な形で移動も行う。「不安定」とは力学的なつり合いのことである。四つん這いなら、倒れそうもないしまた倒れても落差が小さい。「落下」による衝撃も小さいであろう。ところが、人間は突っ立っているので、図のように何もしないで倒れれば 1.5 メートルほどの自由落下となる。それで硬い地面にぶつかった時の衝撃は相当大きく、それで一番大事な頭蓋骨が壊れないのかが問題である。

自由落下して頭蓋骨が岩石にぶつかっても破壊されない限界の高さを計算すると不思議なことに 2 メートルぐらいになるのである。あまり背が高い直立歩行の動物はちょっと転んでも頭蓋骨が破壊されるのでは生存できないのは当然である。計算はあまりにも単純すぎるが、何れにせよ余り高ければ転倒死の危険が高まることが事実であろう。