

## 201808-10雨と地球

### 雨と地球

#### 西日本大雨災害

2018年の関西は地震、猛暑、大雨、暴風とさんざんな年であった。9月4日には台風21号が関西を縦断して甚大な風や高潮の被害をもたらしたが、確かに恐怖を感じる暴風だった。ダラダラした長雨と違って、穏やかな晴天が一転して災害状態になり、数時間でまた晴天に戻る経過は崩れずに遠路やってきた引き締まったままの台風の怖さを思い知らされた。

雨をテーマにしたのは広島などでの大雨の災害が動機である。これでもか、これでもかと雨が降り続くと、一体この水はどこからやってきたのかと恨めしく思う。海に囲まれた日本だから、水源には不足はなさそうだが、それをどうやって持ち上げて、移動させて、地上に落下させる、この水の運搬作業にどれだけのエネルギーが必要なのか、などと理科的な興味もわく。災害を「興味のネタ」にするのは不謹慎のようだが、今回の災害でも、雨の状況の実感から避難行動なりを判断出来るように地形や降雨などの自然のしくみに日頃から認識を深めておくことの大切さが悟らせられる。

#### 降水量の報道

今度の気象の報道でも「1日に一年分」、「一時間に一月の量」、「一時間に100ミリ」などという降水量の大きさを伝える表現が多用された。「一時間に100ミリ」と数字をにわかに言われてもピンとこないことを見越して、「平常の時の何倍だ」という比較で、この異常な降水量を伝えようとしているのである。「異常さ」を「平均」との比較で表現することはよくあるが、これが有効になるためには「異常でない平均的な状況」を体感的にも認識していることが前提である。

#### 平均降水量

平均的な降水量は『理科年表』などにいろいろな形でデータが掲載されている。この数字をみると地域によってずいぶん違うことに気づく。例えば年間降水量についてみると、東京1528mm(1981-2010年平均、以下同じ)はニューヨーク1145と同程度だが、北京584やロスアンゼルス332は随分少ない。和歌山市は1316だが、潮岬は2519、尾鷲3848と多い。これは平常時の天気予報を聞き続

けていると納得できる数字である。年間降水量を12で割った月間平均値は、例えば和歌山市で109となる。しかし実際は、月間で多いのは6月188、9月183、少ないのは1月の44、というふうにはばらついている。「一時間に100mm」とは平均的な月の「一ヶ月分が一時間に降る」ということである。

### 地球全体で見ると

今、仮定の話として地球全面積に年間1000mmの降水量があったとすると、どれだけの水の量になるかを計算してみよう。地球の表面積は大体 $5 \times 10^{14} \text{m}^2$ だから、この底面積に高さ1000mm=1mをかけて、年間に降った雨の水量の体積は $5 \times 10^{14} \text{m}^3$ 、あるいは、 $1 \text{m}^3$ の水は1000kgだから、 $5 \times 10^{17} \text{kg}$ の重量になる。

この数字を念頭において、つぎに図1の数字をみてみよう。図1の三つの四角のブロックは陸、大気、海での水の量である。圧倒的に海にあり、大気中にあるのは海の十万分の一である。固体地球の重量 $6 \times 10^{24} \text{kg}$ は水全体の数千倍である。

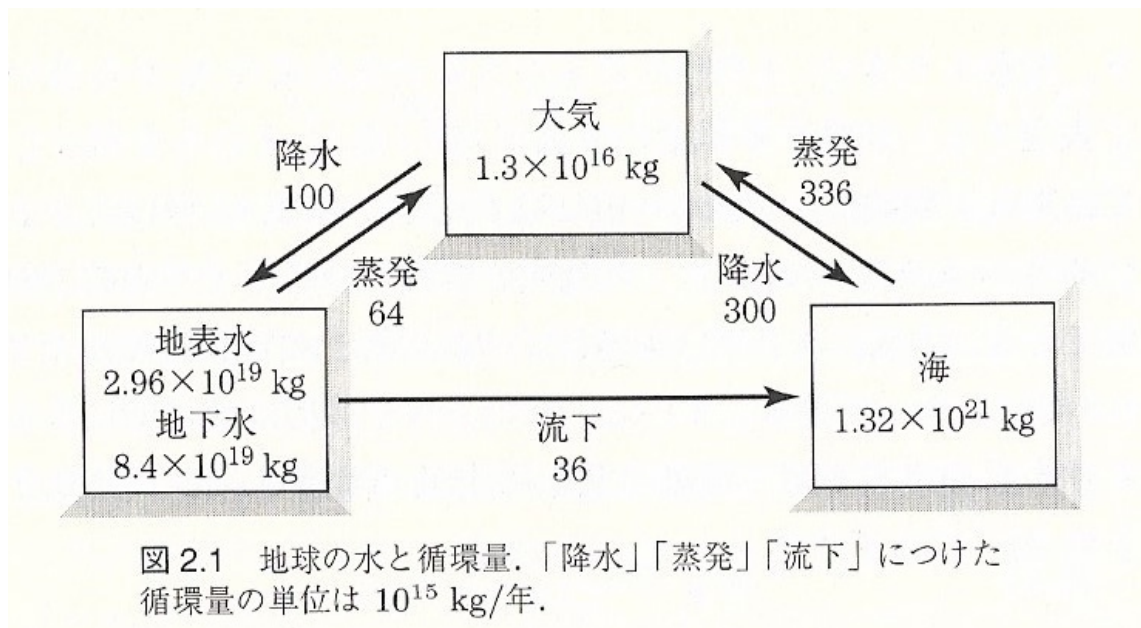


図1：地球全体を「大気」、「地表」、「海」の三つのブロックに分けた際の水の量。矢印はこれらを繋ぐ「蒸発」、「降水」、「流下（川で流れ出る）」を示し、 $10^{15} \text{kg/年}$ 単位での数字である。（図の出所は、佐藤文隆『光と風景の物理』岩波書店）

この三つのブロックをつなぐ過程が降水、蒸発、流下(川で海に流れ出る)で

ある。この図1には地球上の水の循環を矢印で示してあり、その推定量を $10^{15}$ kg/年の単位で示してある。たとえば年間降水量は右の地上に $100 \times 10^{15}$ kg年、海から $300 \times 10^{15}$ kg年で合計 $4 \times 10^{17}$ kg年である。まへの仮定の計算に比べれば、この降雨量は年間800mmの降水量に相当することがわかる。因みに、海の水を含む水全体を一様に地表に存在するとすれば約3000mの水深となる。

雨の水はどこからくる？

図1で地球全体を平均した雨の降水と蒸発の関係を見ると、海で多く蒸発して、陸への降水は陸からの蒸発を上回っていることがわかる。しかし陸からの蒸発も結構多い。大気中の水の量は少ないから、蒸発と降水で、10日ぐらいで新しい水に絶えず入れ替わっていることもわかる。

実際の地球では、海の近くと内陸では、降水と蒸発の大きさは大きく違っている。東京も和歌山市も海岸を持つが、北京は内陸のためか少なく、また大洋（太平洋）の東岸は乾燥するので少ないロスは小さい。（大洋（大西洋）の東岸はアフリカの乾燥地域である。ニューヨークは大西洋の西岸なので太平洋の西岸の東京などと似ている。この理由はここでは海流もからむ複雑なものでここでは取り上げない）。日本はあまり奥深い内陸はないから、海の影響が大きいと考えられる。

地表の水が雨になる過程

豪雨をもたらす水は地球上に十分に存在することはわかったので、次はどうやってそれが雨に変身するかである。それを知らないと、各地の降水量の差も理解できないようである。

雨は雲から降ってくるから、雲の発生が雨の前提である。青空に浮かぶ白雲にしろ、空を覆う灰色の雨雲にしろ、眺めていると落ちてこないのが不思議に思えてくる。拙著『雲はなぜ落ちないのか』（岩波書店）では、落ちないのは透明な空気が支えているからだとし、「空気はなぜ重力で落ちないのか？」という疑問に転換し、その答えは太陽エネルギーだとしている。

空気の分子とその運動のエネルギー

空気中では窒素と酸素の分子が音速ぐらいの速度で飛び回っている。絶えずぶつかり合って運動のエネルギーを交換している。各分子のエネルギーの平均

値が(絶対)温度に比例する。確かに、物体は重力で下に落ちるが、同時に速度も増して、他に当たると反転して戻ってくる。手を離れた弾力のいいボールを思い浮かべれば、落ちても元に戻ってくる実感がわく。運動のエネルギーが他にいかずに保存すれば、重力で空気分子が地面に降り積もるようなことはないのである。それに対し、運動エネルギーが赤外線などの放射の形で地球の外に抜ければ、エネルギーは保存しないから、空気の沈下が起こる。

#### 温度で膨らんでいる空気層

運動エネルギーが放射で抜ける云々の話は例の二酸化炭素による温室効果と関係している。実際、夜間には少し熱が抜けるので温度が下がり、空気層の高さが少し低くなる。夜間に冷えた分が、昼間の太陽光ですぐ回復するから、大気の厚みはほぼ一定に保たれている。その意味では、雲が落ちてこないのも、それを支える空気が落ちないのも、太陽のおかげであるといえる。

また日本のような中緯度では空気層の平均的な高さは約1万メートルであり、長距離水平飛行の旅客機の高度である。この空気層上端の高度は暑い赤道付近では3割くらい高く、寒冷の極地では低い。

#### 分子の空気と水滴の雲

空気は分子の集団だが、雲として見えるものは水滴であり雲粒と呼ばれる。太陽光の光の波長に比べて分子は小さいので目にはみえず、雲粒は波長より大きいので白雲や雨雲として目に見える。雲のあるところには雲粒の重さの千倍もの重さの見えない空気分子があるのだが、透明なので見落とされているのである。

本題の雲の発生に戻ると、課題は地上の液体の水を空高くの雲の水滴にどう変身さすかである。ここでも、水も水分子の集団であり、温度で決まるいろいろな速度で動いているのだとイメージすることが大事である。液体(水)や固体(氷)では水分子同士が接触して結びついているが、気体(水蒸気)ではその力を振り切って自由に飛び回っている。

#### 水から飛び出す分子の割合

平均エネルギーは温度に比例するが、分子の中には平均以下のものも、平均以上のものも含まれている。平均のものが多いが、平均からずれたものもある

程度は含まれている。

平均からずれて十分大きなエネルギーを持つものが液体から飛び出して水蒸気となる。飛び出す(蒸発する)割合は温度で決まり、温度が高くなると急激に多くなる。この様子を描いたのが図2である。曲線は各運動エネルギー $E$ (横軸)での粒子数(縦軸)を表す。飛び出すのに必要な最低エネルギー $E_0$ よりも $E$ の大きな分子の比率は温度が高いと大きい。夏に雨が多い、熱帯地帯で雨が多い、などは大雑把にはこれで理解される。

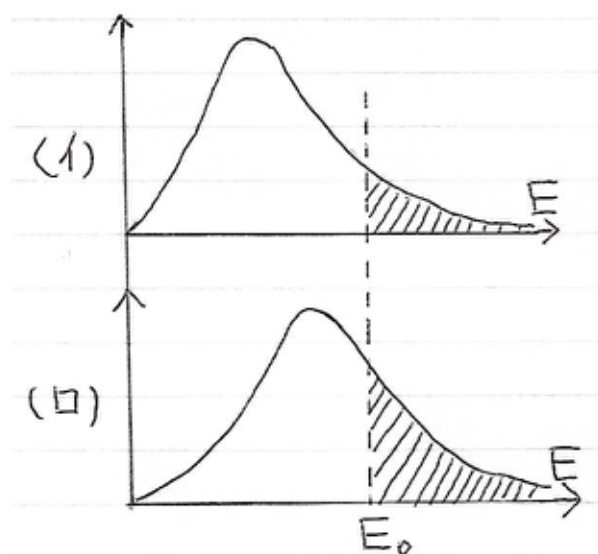


図2:低温(イ)の場合に比べて、高温(ロ)の場合には、高いエネルギーの分子の数が多。このため蒸発に最低必要なエネルギー $E_0$ 以上の数の割合(斜線部分)は高温の場合(イ)が低温の場合(ロ)より大きい。だから水と接している空気中には、暑い日には水蒸気の量が多いのである。

### 水蒸気の結露で雲粒

水蒸気を空高く持ち上げるメカニズムはいろいろある。一つは空気の分子の衝突を受けて上の方にも拡散していく。ただ一気に拡散はせず、その間に空気の塊(気団)の流れとして山に沿って上昇したりする。また強い日射で水面や地面の温度が増して周囲より温度の高い気団ができると、その気団は浮力で上昇もする。何れにせよ持ち上げるエネルギーは空気の熱運動であり、その源となれば太陽の光である。

上空にいくと周囲の圧力が小さいので気団は膨張して温度が下がる。温度が

下がると水蒸気が水滴になる結露が起こる。寒い日のガラス窓で室内の水蒸気が結露してガラスが曇るのを思い出せばいい。例えば30Cでの飽和蒸気量は $30\text{g}/\text{m}^3$ であるが実際はこれ以下で例えば $20\text{g}/\text{m}^3$ だけ蒸発したとする。この気団が上空で10Cぐらいに冷えると、そこでの飽和蒸気量は $9\text{g}/\text{m}^3$ だから、20から9を引き算した、 $11\text{g}/\text{m}^3$ は液体の水になる。まず細かい雲粒となり、それらがひっついてサイズの大きな水滴である雨粒に成長する。重い雨粒は空気分子の層をすり抜けて降雨となる。雲の厚みが100mなら、降雨量は1.1mmとなる。

### 雲の形成と空気の移動

(A)熱で水から蒸発した水蒸気が上空に運ばれて温度が下がり、(B)冷たいガラス窓に水滴が結露するように、水蒸気の水分子は細かな水滴の雲粒に変わり雲を形成する。(C)雲粒の密度が高い雲だと、雲粒の衝突のたびに合体して水の粒が次第に大きく重くなり、空気で支えきれずになって、雨粒として落下してくる。これが雨の降るプロセスであった。

雨の降り方は、熱帯や温帯、海上や大陸、色々と違う。それは降雨のプロセスの中で(A)「水蒸気が上空に運ばれて」という部分が色々あるからである。

「水蒸気が上空に」といっても、水蒸気だけが上空に行くのではなく、水蒸気が豊富な空気の塊が「上空に運ばれる」のである。

### 山ではなく、空気に乗り上げる

「空気の塊」が山の斜面に沿って風で押し上げられる場合はイメージしやすい。確かに、日本のように山が多いとこれでよいのは事実である。しかしこれが全部ではなく、山がなくても「上空に運ばれる」。冷たい空気の塊の上に温暖な空気の塊がのり上げたり、温暖な塊の下に冷たい塊が潜りこんで温暖な塊を持ち上げる。ただ空気の中で「空気の塊」を運ぶというのをイメージするのは簡単ではない。

### 周囲と一体で動く

「固い物体」と違って水蒸気の豊富な「空気の塊」は、はっきりした境界もなく、周囲の空気によって支えられているのである。「空気の塊」が別の場所に移動するには、もともとそこにあった「空気の塊」も移動してその場所を空けてくれなければ移動できない。即ち、関心のある「空気の塊」が空気を掻き

分けて移動するというより、もっと大きな領域での空気の全体的な流れによって「水蒸気の豊富な空気の塊」も移動するという見方が大事になる。だから降雨の話は空気の移動の話になるが、移動には台風や強風の様なスピード感のあるものだけでなく、あまり動きを感じさせずゆっくりした移動もある。長雨になる天気予報でよく耳にする「前線」での降雨がそういうものである。

### 地球の日当たり具合

ここで雨の話 少し離れて、地球上で空気の流れがなぜ起こるのかの基本をおさえておこう。空気の動きは全て太陽光のエネルギーに由来する話である。まず空気は太陽光に透明なので素通りして地球表面に達して吸収されて熱となり、それが接する空気に伝わる。だから空気にとっては太陽エネルギーの源は下にあり、下から上に伝わる。

太陽光を受け止める地球表面に着目しよう。ある地点に注目すると、地球は自転しているので昼夜で太陽光は変動するし、また雲の有無で表面に達する太陽光も変化する。回転軸が傾斜しているので四季によっても違う。さらに同じ量の太陽光が当たっても、その表面が海か陸か、砂漠か森林か、といった表面の性質で、空気に取り込まれるエネルギー量は違ってくる。一般に、水面に比べて、地面は熱し易く冷め易い。太陽による空気の暖まり具合は、地球表面の多様性によって、スポットスポットで違ってくるのである。この一様でない気圧や温度の分布が、「空気の塊」が移動する流れの起源になる。

### 緯度ごとのエネルギー収支

ここで地球を全体的にみた話に急に飛ぶが、地球の地域差を緯度によって大雑把に分類した時のエネルギー・バランスに注目しよう。これを表したのが図である。この図で上が北極、下が南極、真ん中が赤道である。各緯度の地点で太陽のエネルギーとその地点から宇宙空間に放射されるエネルギー量を横軸に示してある。

図3で白丸を繋いだのが太陽光で「地球に入るエネルギー」、黒丸を繋いだのが主に赤外線「地球から出ていくエネルギー」である。この図で注意すべきは赤道近くの低緯度では「入る」が「出ていく」を上まわり、高緯度では「出ていく」が「入る」を上まわっていることである。ということは低緯度で受け取ったエネルギーの一部は高緯度に運ばれてから「出ていく」という事実

である。この移動には、海洋での移動も一部あるが、台風はじめ色々な気象現象がこのエネルギー移送に与っている。エネルギーは地産地消ではなく、高緯度では熱帯からの供給で賄われているのである。

図3の説明

(図の出所：東大大気海洋研 HP、Vonder Haar & Suomi)

