

4 気象の物理——ペットボトルで雲を作る

熱・気体に関する法則を取り上げます。

4.1 温度は何で決まるのか

物理用語の「熱」は、エネルギーを表す。熱は、温度の上昇や、外への仕事に変化できるからだ。それでは、温度の正体は何なのだろうか。私たちには見えない「分子運動」を想像することがキーポイントになる。

4.1.1 温度

■温度

物質の三態（固体・液体・気体）は、分子の運動状態で決まっている。分子運動の激しさを表すのが、**温度**である。

物質は温度を下げていくと、分子運動が弱くなり、体積が縮む。マイナス 273.15 °C まで下げると、分子運動エネルギーがゼロとなり、これ以下に温度を下げるできない。そこで、この温度を**絶対零度**として、絶対零度を基準とした温度の単位を使う方が、物理法則には適している。

定義 絶対温度

温度は、日常では摂氏温度 t [°C] だが、物理法則では**絶対温度** T [K] (ケルビン) を使う。両者の関係は、

$$\text{絶対温度 } T[\text{K}] = \text{摂氏温度 } t[^\circ\text{C}] + 273.15 \quad (1)$$

物質の三態 ⇒ §4.1.2
温度 (temperature)
 絶対零度
 (absolute zero)
 絶対温度
 (absolute temperature)
 摂氏温度
 (Celsius temperature)

単位

温度は、摂氏温度 [°C] (度) あるいは絶対温度 [K] (ケルビン)。

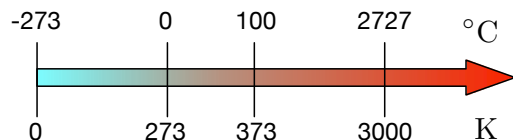


図 2: 絶対温度は、分子の熱運動がゼロとなる最低温度を 0 K としたもの。0 °C = 273.15 K であり、100 °C = 373.15 K である。

■分子運動

物質を構成している分子や原子は、常に激しく乱雑な運動をしている。このような運動を**熱運動**という。19 世紀はじめ、イギリスのブラウンは、花粉から出た微粒子を水に浮かべると細かく不規則な運動をすることを発見

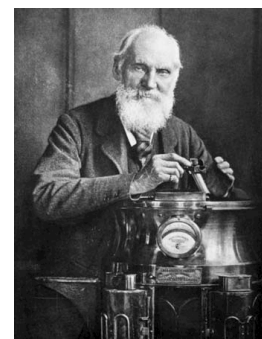


図 1: ケルビン Lord Kelvin, W.T. (1824–1907)

した（**ブラウン運動**という）。この理由は熱運動している水の分子が微粒子に衝突するためだ、と後にアインシュタインが明らかにした。

風船が膨らむのは、風船の中の気体分子が高速で風船内面に衝突するからだ。温度を上げると風船はさらに膨らむ。これは、熱運動が激しくなっていることを示している。外部から物体に移動した熱運動のエネルギーを**熱**または**熱エネルギー**、その大きさを**熱量**という。熱量の単位は、エネルギーと同じ [J] (ジュール) を用いる。風船自身は動いていなくても、分子運動の形で気体はエネルギーを持っている。このような形のエネルギーを気体の**内部エネルギー**という。



図 3: 分子運動 (a) ブラウン運動の正体は液体中の分子が多数不規則に粒子にぶつかること。 (b) 気体分子が風船の内側にぶつかって押し出すことで、風船は膨らむ。

■熱膨張と収縮

熱を加えると分子運動が活発になって物質の体積は増加する。鉄道の線路は夏場に伸びるため、あらかじめ伸びる余地を残して設置されている（そのために、ガタンゴトンと音を立てて走ることになる）。

Topic

水銀式体温計を振って戻す理由

水銀式体温計は、水銀の熱膨張を利用して体温を測るものだ。体から離しても体温が読み取れるように、体温計の管には細くくびれたところがあって水銀の逆流を防いでいる。膨張するときはこのくびれを通れたが、収縮するときには通れない。それは長く伸びた部分を引き戻せるほど水銀の分子間力が強くないからで、細いところで水銀は切れてしまうからだ。振って遠心力を起し、圧力を加えて水銀をもどす必要がある。



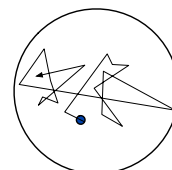
図 4: 水銀式体温計 (最近見ませんが。)

ブラウン運動を見てみよう

実験

100 倍以上にうすめた牛乳をスライドガラスに載せ、400–600 倍程度の顕微鏡で観察してみよう。牛乳の温度を変えると運動の様子はどうか、試してみよう。

図 5: ブラウン運動



単位

熱量は、[J] (ジュール). [cal] (カロリー) を使うこともある。
 $1 \text{ cal} = 4.19 \text{ J}$ である。
 \Rightarrow §5.3.1

内部エネルギー
 (internal energy)

4.1.2 物質の三態

■水の状態図

固体・液体・気体の3種類は、分子の結びつき構造で決まる。分子がしっかりと結ばれていれば固体、分子が自由に飛び回れるならば気体である。

例えば、液体と気体が接しているとき、見かけ上何の変化も生じていないように見えても、蒸発する分子と凝縮する分子がある。環境条件が一定であれば、両者の数は同じであり、**平衡状態にある**という。

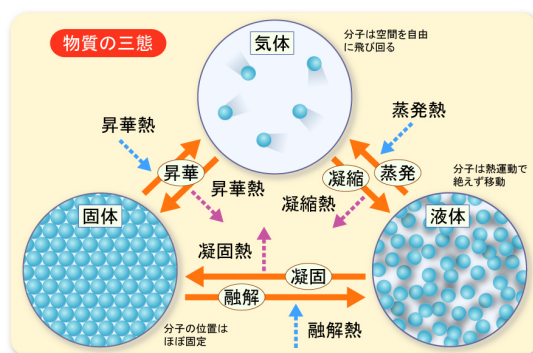


図 6: 物質の三態.

Topic 湖が凍っても魚が生きられる理由

水は、分子構造上、温度 4°C のときに最も体積が小さくなる。つまり、 4°C の水の比重が一番重い。冬に外気の影響で湖が凍っても、湖底には 4°C の水が存在する。魚は 4°C で生き延びられるように進化しているのだ。

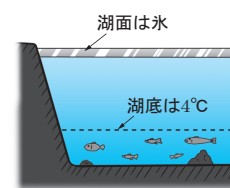


図 7: 4°C に耐えられれば越冬できる。

Topic 過冷却と樹氷

水が凍ったり、沸騰したりするきっかけは不純物の混入による。精製水をゆっくりと -5 度の冷蔵庫で凍らせると、液体のまま (**過冷却状態**) であり、外気に触れた瞬間に凍りつくようなことになる。雪国などで見られる樹氷は、過冷却状態の水滴が木にぶつかって、一瞬で凍ることが1つの理由だという。



図 8: ぶつかると凍る過冷却の風。

■融解熱・気化熱 (蒸発熱)

固体から液体、液体から気体に状態が変化するときは、分子運動に多くのエネルギーを与える必要がある。このときに加えるエネルギーをそれぞれ **融解熱**、**気化熱 (蒸発熱)** という。

水から水に変化するとき、熱を加え続けても、水が残っている限り、温度が 0°C のままでしばらく一定になるのは、熱が融解熱に使われているからである。水から水蒸気になるときも同様である。

腕にアルコールを塗られると、ヒヤッと涼しく感じるのは、アルコールが蒸発するときに皮膚から熱を奪うからである。

融解熱 (heat of fusion)
気化熱 (蒸発熱)
(heat of evaporation)

氷の融解熱

1[g] あたり, $333.5 \text{ [J/g]} = 80 \text{ [cal/g]}$.
(1[mol] あたりでは, 6 [kJ/mol])
 $= 1440 \text{ [cal/mol]}$

水の蒸発熱

1[g] あたり, $2257 \text{ [J/g]} = 540 \text{ [cal/g]}$
(1[mol] あたりでは, 41 [kJ/mol])
 $= 9720 \text{ [cal/mol]}$

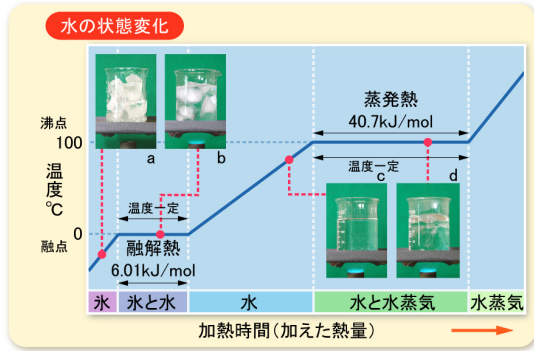


図 9: 水の状態変化.

コラム

コラム 9 (太陽の温度はどうやって測る?)

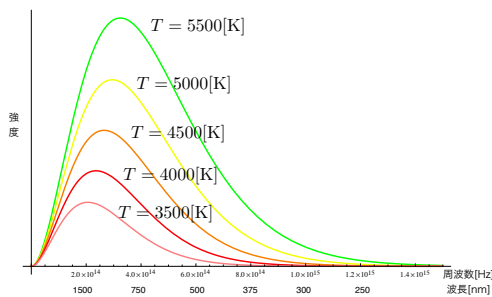


図 10: 光の放射されるエネルギーと波長の関係は温度によって変わる.

19 世紀末, 鉄鋼業が始まったヨーロッパでは, 溶鉱炉の温度を測って制御する必要が生じた. 鉄を熱するとまず赤くなり, さらに温度が上がると青白く光る. 高温物体は光を放射するが, 温度が高くなるほど, 波長が短い色に変化することがわかった (色の正体は, 光の波長である.). さらに研究が進むと, 高温の気体から放射される光のエネルギー分布は, 温度によって変わり, 図 10 のようになることがわかった.

この関係から, 「温度によってもっとも強く放射される光の波長が決まっている (ヴィーンの法則; Wien, 1864–1928)」ことと「放射される全エネルギーは温度の 4 乗に比例する (シュテファン・ボルツマンの法則; Stefan, 1835–1893; Boltzmann, 1844–1906)」が導かれた.

なぜこのような曲線になるのかを説明したのは, プランク (Planck, 1858–1947) である. 光のエネルギーには最小単位があることを仮定した光の量子仮説 (1900) は, のちに量子論と言われる現代物理学の柱の 1 つになってゆく.

太陽の表面温度が約 5800 K とわかるのは, このような光の色の強度分布 (スペクトル解析) からである. 地球が太陽から受けるエネルギー量は (大気圏外で) 面積 1 m^2 あたり 1 秒間あたり 1.37 kJ である. これを**太陽定数**という (1 cm^2 あたり 1 分あたり約 2 cal である). この値から太陽の全エネルギー放射量を見積もることができ, 表面温度の計算値はきちんと一致する.

問題と研究

問 4.1 打ち水で涼しくするのはなぜか.

いて物理的に説明せよ.

問 4.2 「汗で濡れたシャツを着ていると, 風邪を引くよ」という意味を蒸発熱という言葉を用

問 4.3 熱が出ている人に与える枕として, 0°C の水枕と 0°C の氷枕ではどちらが効果的か.

4.2 伝導・対流・放射

熱エネルギーは、**伝導・対流・放射**の3種類の方法で伝わる。

- **伝導**：物質の内部で熱が伝わること。
例：鍋の底，使い捨てカイロ
- **対流**：気体や液体が移動することにより熱が伝わること。
例：鍋の中，エアコンによる冷暖房，風呂
- **放射**（または輻射）：物体が電磁波の形でエネルギーを放出すること。
例：太陽熱，ストーブ，焚き火

Topic 魔法瓶

魔法瓶は、液体を入れる部分と外気に触れる部分の間に薄い真空層があり、熱伝導と熱放射を防ぐしくみである。特許が許可されたのは、1907年と結構古い。

最近の家の窓は、2重ガラスになっていて、ガラスの内側には薄い真空層がある。これも魔法瓶と同じしくみ。

Topic 温室効果ガス

太陽から地球に熱が届くのは、放射による。地面や海面が放射によって暖められ、それが空気や海水を暖める。そして空気や海水が対流を起こして、熱を地球全体に循環させる。もし、地球に空気や水がなかったら、太陽からの熱があたる部分は灼熱の高温になり、日陰の部分は非常に低い温度になってしまうだろう。

地球の熱も宇宙空間に放射して逃げていく。幸い地球は、温室効果ガスに取り囲まれていて、ある程度の熱は保持される。もし、温室効果ガスがなければ、地表の温度は -18°C になってしまう。

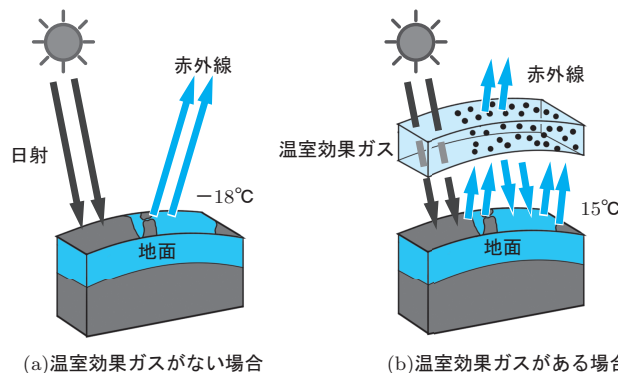


図 12: 温室効果ガスがなければ、地表の温度は -18°C 。

伝導 (conduction)
対流 (convection)
放射 (radiation)

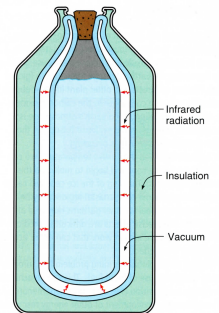


figure 10.21 Radiation is the only mechanism that can carry thermal energy across the evacuated space in a thermos bottle. Silvering the walls reduces the flow of radiation.

図 11: 魔法瓶 (Thermos).

温室効果ガス (greenhouse effect gas)

4.3 飽和水蒸気量

空気中に溶け込める水蒸気の量は、温度によって変わる。

1 m³ の空気が含むことのできる水蒸気の最大質量を g で表したものを**飽和水蒸気量**という。グラフにすると、図 10 の 100% の線のようになる。

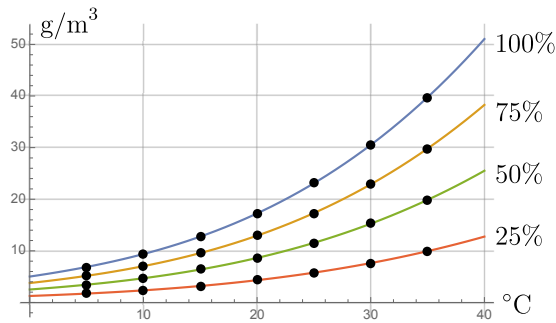


図 13: 飽和水蒸気量 (図の 100% の線) の温度変化の様子。

飽和水蒸気量

気温 °C	飽和水蒸気量 g/m ³
35	39.6
30	30.4
25	23.1
20	17.3
15	12.8
10	9.4
5	6.8
0	4.8

湿度 (humidity)

飽和水蒸気量を 100 として、空気中に含まれている水蒸気の量を表す数字が**湿度** (相対湿度) である[†]。気温 30 °C のとき、1 m³ の空気が 10 g の水蒸気を含んでいれば、湿度は 32.7 % になる。この空気がそのまま冷えると、温度 $T_0 = 11.0$ °C で飽和し、この温度 T_0 以下では**結露**する。このような温度 T_0 を**露点**という。

例えば夏に冷たい飲み物をコップに入れて放置すると、コップの外側に水滴がつくが、これは、コップの周囲で冷やされた空気が、それまでに含んでいた水蒸気を貯め込めずに結露したものだ。干していた洗濯物をしまい損なうと夜には湿気を帯びてしまうのも、冬に水蒸気が多い室内の空気が窓の近くで結露するのも同じ理由である。

[†] 正確には重量比ではなく、飽和水蒸気圧に対する水蒸気圧の分圧で定義されるが、ほぼ同じである。



図 14: ビールジョッキも汗をかく。

雲をつくってみよう

実験

ペットボトル内で雲をつくることができる。大きなペットボトルと、フィズキーパーと呼ばれる炭酸抜けを防止する栓を用意しよう。ペットボトルの中を少し湿らせ (霧吹きでひと吹き)、線香の煙を入れておく (雲の種となる)。フィズキーパーを取り付け、中の空気の圧力を上げる。圧力をあげると、閉じ込められた空気の温度が上がり、ペットボトルの中は透明になるが、そこで一気に栓を開けると、急に圧力が下がり、温度が下がって、露点に達し、雲が発生する。

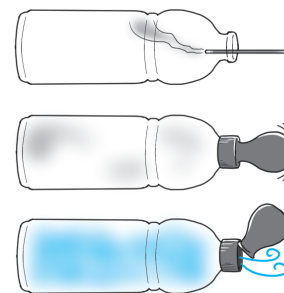


図 15

コラム 10 (天気予報で出される「〇〇指数」)

夏場になると「不快指数」という言葉を耳にする。アメリカの旅行天気会社が考え出した量と言われるが、気温 T と湿度 H をもとにして、露点温度 T_0 を計算し、

$$\text{不快指数 } D = 0.72(T + T_0) + 40.6 \quad (2)$$

として計算する量だという。だが、この量は、風の影響を含めていないので、必ずしも体感と一致するわけではなく、気象庁の統計種目でもない。

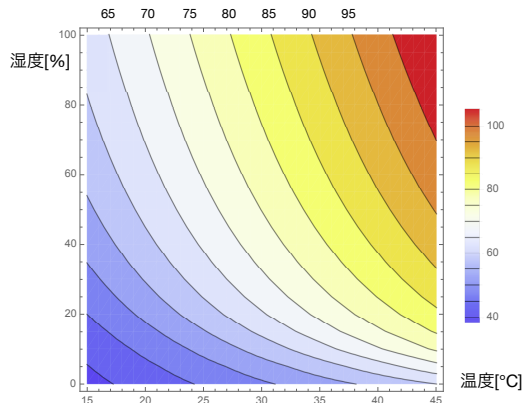


図 16: 温度と湿度から不快指数を読み取る図。70 以上で一部の人が、75 以上で約半数、80 以上でほぼ全員が不快と感じ、85 以上で全員が苦痛を感じる、という。

最近では天気予報会社が付加価値を出すために「洗濯指数」「お出かけ指数」「ビール指数」「鍋もの指数」「のど飴指数」など、さまざまな数値を予報して出している。各社が気温・湿度・風速・日射量などを基に独自に計算しているもので、詳細な計算方法はほとんど公開されていない。

Topic 冷蔵庫の中はなぜ乾燥するのか

冷蔵庫内は -40°C 程度にまで冷却機で冷やされた空気が循環し、庫内の温度を下げる。冷気は周囲から熱を奪い、自分自身の温度は 0°C 程度にまで上昇する。そうすると飽和水蒸気量は増えるので、冷蔵庫内の食材から水分を奪い取ることになる。最近の冷蔵庫には密閉された野菜室など工夫がされている。

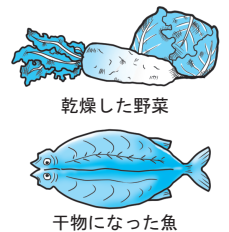


図 17: 冷蔵庫のミイラ。

4.4 コリオリの力（転向力）

台風の渦巻く向き、高気圧から低気圧への空気の流れを説明するのがコリオリ力（転向力）である。

■コリオリの力

地球など回転している座標系で、運動する物体を考えると、回転に応じた力を考える必要が生じる。コリオリが1828年に発見した力で、**コリオリの力**とも呼ばれる。

図18は、地球上を移動する大気の動きである。赤道付近のAから高緯度地帯に向かって風がふくと、地球の自転に伴う回転速度が高緯度では相対的に小さな値であるため、Aからの風は右向きに曲がる(B)。逆に高緯度から低緯度に向かって進む風は、進むにつれて自転の速度成分が大きいため、やはり右側へ曲がる(CからD)。これがコリオリ力である。

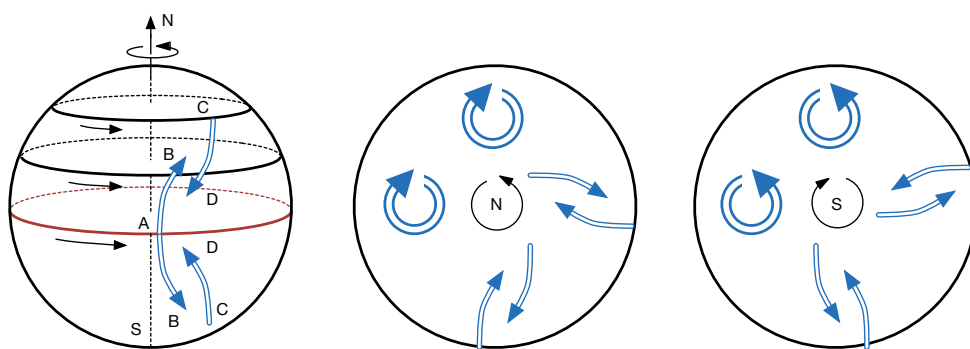


図18: [左] 回転する物体上で運動すると、回転する速度成分の違いから、物体の運動方向は曲がる。[中] 北極方向から見た図（左回り回転盤上の運動）。[右] 南極方向から見た図（右回り回転盤上の運動）。

北極方向から見ると地球は反時計まわりに回転しているが、北半球でのコリオリ力は進行方向に対して右向きにはたらく。南極方向から見ると地球は時計まわりに回転しているが、南半球でのコリオリ力は進行方向に対して左向きにはたらく。

法則 コリオリの力（転向力）

回転運動をする物体に沿って運動を考える時には、慣性力としてコリオリ力が加わる。反時計まわり（時計まわり）に回転する盤上では、運動する物体は進行方向に対して右向き（左向き）に力を受ける。

コリオリの力・転向力
(Coriolis force)

Gaspard-Gustave Coriolis
(1792–1843)

回転していない立場で運動方程式を立てて解くならばコリオリ力は不要だが、直観的に理解するには便利な説明である。

コリオリ力は非常に弱い力だが、地球上で大きな流れとなってみることができる。海流は日本海流（黒潮）もメキシコ湾流も大きく時計まわりに動く。偏西風が吹くのもコリオリ力の影響である。

コリオリ力により、高気圧から風が流れ、低気圧に風が流れ込むときに、北半球では常に時計回りになるように風が進む。低気圧の近くでは、全体として反時計回りに風が巻き込まれていく（図 19）。台風がいつも反時計回りなのは、このような理由による。南半球の台風は逆回りであり、赤道上で台風は発生しない[†]。

[†]ちなみに、北半球で台風が進むと、進行方向の右側では台風巻き込む風の向きと進行方向の速度が重なるが、進行方向の左側では互いに相殺しあう。台風が太平洋側を通り過ぎると、本州では比較的穏やかになるのである。

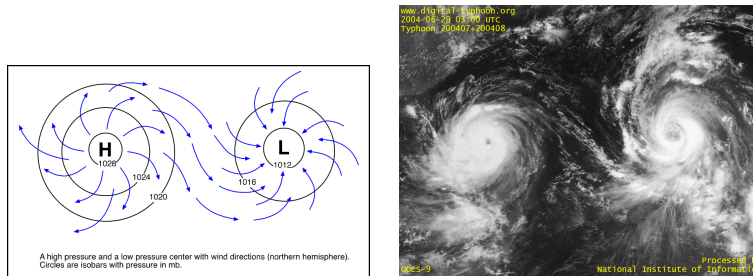


図 19: [左] 高気圧から低気圧へ空気が流れると、(北半球の場合) 常に進行方向右向きにコリオリ力を受けるため、高気圧から出るときは時計回りに、低気圧へ巻き込まれるときには反時計回りに風になる。[右] 2004 年 6 月、太平洋上の台風 7 号と 8 号。

Topic 風呂の栓を抜いて水が回り込む方向

風呂や洗面台に水を溜め、栓を抜いて流れる様子を確認してみよう。低気圧と同じように吸い込まれていく水は、北半球では、反時計回りになっている。・・・という説明が書かれている本がよくあるが、コリオリの力はとても弱く、地球規模の運動でようやく出現するものである。風呂や洗面台では、栓の場所や初期の水の回転運動などがその後の回転運動を決めてしまうようだ。洋式水洗トイレの水の流れの向きも構造上のものである。

Topic フーコーの振り子

地球が自転していることを証明した実験として、フーコーが行った振り子が有名である。長いひもにおもりを付けて長時間振り子を振れさせると、振動方向が見かけ上回転してゆく、という現象である。1851 年、パリ天文台とパンテオンにて公開実験が行われ、人々を感心させた。パンテオンの実験では、全長 67m のワイヤーで 28kg のおもりを吊るしたものを使ったそうだ。回転する原因はコリオリ力である。北半球では右回りに振動面が回転し、1 周するのに必要な時間 T は、緯度 θ の地点では、 $T = 24 \text{ 時間} / \sin \theta$ になる。北極点では 24 時間、赤道では回転しない。北緯 35 度ではおよそ 41.8 時間である。

Jean B. L. Foucault (1819–68)

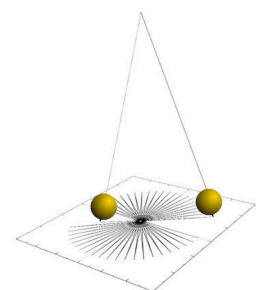


図 20: フーコーは、地球の自転を振り子で証明した。

コラム 11 (温暖前線・寒冷前線)

天気図は、各地の気象台が測定した気圧、風向、風力の情報から、大気の等圧線を描くことで得られている。天気図に登場する前線について説明しよう。暖かい空気（暖気）と冷たい空気（寒気）が混ざっている場所で天気が急変する場所が前線である。

まず、暖気と寒気が接したとしよう。暖気の方が密度が薄いので寒気の上に重なり合うことになる。このように空気が動き始めると、北半球であれば、コリオリ力によって回転を始める。寒気も暖気も進行方向右側に力を受けて回転するため、接触面は反時計まわりに回転を始める（図 21〔上〕）。

地上では寒気が進んでくるところ（寒冷前線）と、暖気が寒気の上に乗り上げ始めるところ（温暖前線）が生じる。どちらの前線も反時計まわりに動く（図 21）。

寒冷前線の上空では暖気が急上昇して積乱雲が生じる。積乱雲は短時間に強い雨を降らせるので、寒冷前線の通過後は天気が悪くなる。温暖前線がやってくる前には、暖気は緩やかに寒気の上に昇り乱層雲を作る。この雲は穏やかな雨を降らせるが、温暖前線通過後は天気が好転する。（図 22）

暖気はますます上へ追いやられるので、寒冷前線のスピードの方が温暖前線よりはやく、やがて2つの前線は合体して閉塞前線となる。

寒冷前線が接近すると、空気が対流して地表付近のちりなどが巻き上げられる「煙霧」と呼ばれる現象が発生することがある。いきなり空全体が黄色や紫色に変わり、一時的に視界が悪くなることになる。

なお、このほか、暖気と寒気が同じ程度の強さで拮抗しているときには、地上には停滞前線ができる。春から夏への変わり目の梅雨や、秋から冬への変わり目の長雨は、停滞前線の影響だ。

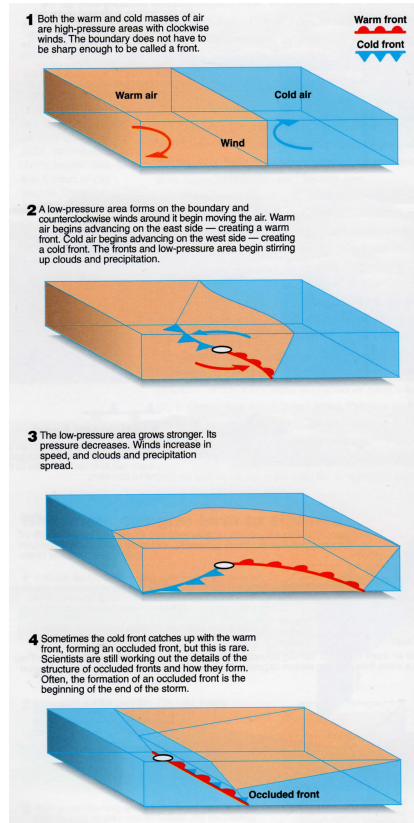


図 21: 低気圧に前線が2つできる様子。

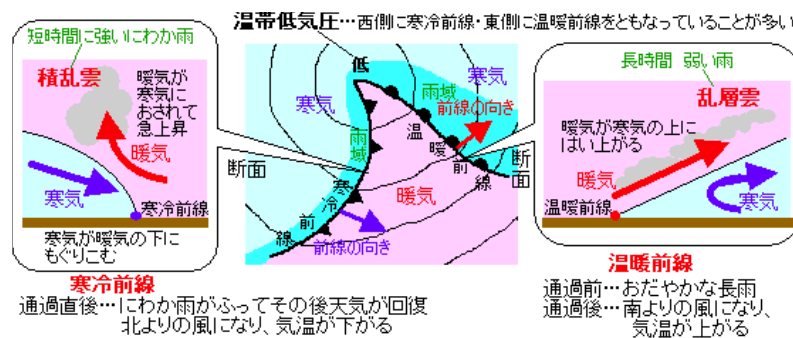


図 22: 前線の前後での気流の変化。