

いきなりですが、問題です。雪はいつ降るでしょう？ 答えは簡単、冬ですね。冬は気温が下がり、0度以下になると雪が降ります。ただ、標高の高い山や日本より緯度が高い（北半球では北方の）場所では、冬でなくても雪は降ります。これは、標高が高いほど気温が低く、また北ほど気温が低いからです。

当たり前のように思われているこの「北ほど気温が低い」、「標高が高いほど気温が低い」ことについて見ていきましょう。この2つは同じ「気温が低い」でも、原因がまったく異なります。両者の原因を知るためには地球の大気の構造を知る必要があります。ここからしばらく雪から離れ、大気の話になります。早く雪の話を読みたい人は、1・1節を読み飛ばしてもらって大丈夫です。

1.1

そもそも気温が低くなるのはなぜ？

北極や南極で気温が低いわけ

緯度が高いほど気温が低い理由から見えていきましょう。これは、緯度によって太陽の光の入る角度が違うことが関係しています。太陽の光が地球に対して水平に入ってきたとき、赤道付近には90度に近い角度（春分、秋分の日には90度）で太陽の光が入るために、太陽から最大のエネルギーを得ることができます。一方、高緯度になるほど、太陽からの光が斜めに入ることになり、得られるエネルギーの量が減ります（図1・1）。例えば、30度の角度で光が入ると、地面が受け取ることのできる太陽光は、直角のときと比べて半分になります（同じ日射量が2倍の面積の地面に入ることになる）。このため、太陽の光を受け取りにくい高緯度（北半球では北、南半球では南）に行くほど気温が低くなります。ただ、北半球では北極の気温が最も低いかというところで

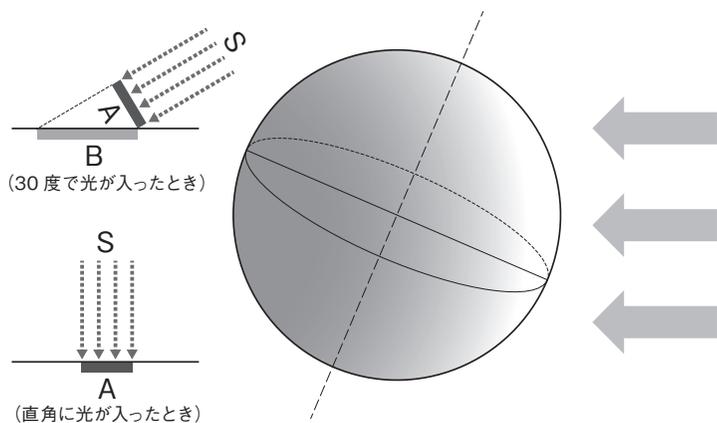


図 1.1 | 地面が受ける太陽光 (S) と入射角の関係

もなく、海陸分布や地形などの影響により、最も気温の低い地点は北極点からかなりずれます。

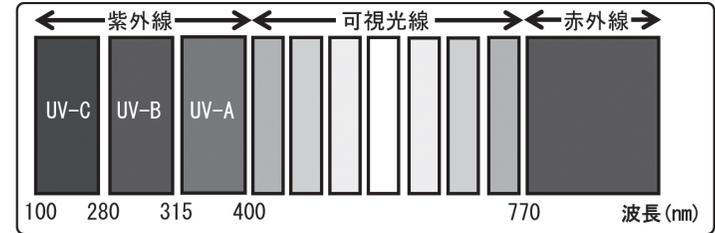
もう一つ、地軸の傾き、つまり地球が自転するときの軸（地軸）が約23・4度傾いていることは、地球に四季をもたらすと同時に、低緯度と高緯度の気温差をさらに大きくします。日本では地軸の傾きのおかげで四季折々の気候や風景を楽しむことができますが、高緯度ではそうはいきません。北半球の高緯度では、冬にほとんど太陽の光が入らず、北極域では一日中太陽が出ない極夜きょくやとなります。逆に夏は、一日中太陽が出続ける白夜びやくやとなります。南半球では北

半球と季節が裏返しになるので、北極域が極夜のときに南極域は白夜、北極域が白夜のときに南極域は極夜となります。極夜の期間は太陽のエネルギーを得ることができず、常に放射冷却によって熱が失われていきます。

ここで「放射冷却」という言葉が出てきました。放射冷却は、冬の晴れた日の朝に地上気温が下がる原因として、天気予報でもよく用いられる言葉です。ここでは光の特徴を踏まえて、もう少し詳しく見ていきましょう。人が見ることができる光は可視光線と呼ばれます。可視光線は電磁波の一種で、波長がおよそ0・35から0・8マイクロメートル（マイクロメートルは千分の一ミリメートル）程度の光です。可視光線よりも波長の短い光を短波放射、長い波長を長波放射と呼びます。雨上がりに見える虹は、光が大気中の水滴の中を通過するときに屈折・反射し、さまざまな色が見える現象です。虹は内側から順に、波長の短い紫、青、緑、黄、橙だいたい、赤と変わっていきます。人の目には見えませんが、紫色の外側が紫外線、赤色の外側が赤外線です（図1・2）。短波放射は太陽などの高温の物体から出ます。太陽の光は主に波長の短い紫外線と可視光線からなり、波長の長い赤外線も一定量含んでいます。紫外線から皮膚を守る

却の正体です。地球は、太陽から届く短波放射（紫外線）と、地球から出ていく長波放射（赤外線）のバランスをとることで、一定の気温を保っています。北極域の冬は、太陽からのエネルギーが入らないため冷えていく一方ですが、同時期に南半球では、普段よりたくさんエネルギーを太陽から得ているので、地球全体としての気温は安定しています。

ところで、たしかに地球の気温は太陽から届く短波放射と地球から出る長波放射のバランスによって決まっていますが、もし地球に大気がなければ、地上気温はマイナス約19度になってしまいます。いま、地球を人や動植物が住みやすい環境（平均気温約14度）にしてくれているのは、大気に含まれる二酸化炭素などの温室効果ガスです。一方で、温室効果ガスは地球温暖化を引き起こす原因の物質として問題視されています。これについては本書の後半（3・2節）で詳しく触れることにしましょう。



紫外線

UV-A (波長：315-400 nm)

大気による吸収をあまり受けずに地表に到達します。生物に与える影響はUV-Bと比較すると小さいものです。太陽からの日射に占める割合は数%程度です。

UV-B (波長：280-315 nm)

成層圏オゾンにより大部分が吸収され、残りが地表に到達します。生物に大きな影響を与えます。太陽からの日射に占める割合は0.1%程度です。

UV-C (波長：100-280 nm)

成層圏及びそれよりも上空のオゾンと酸素分子によって全て吸収され、地表には到達しません。

図 1.2 | 波長によって分かれる紫外線、可視光線、赤外線。nmはナノメートル。出典：気象庁ホームページ (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-40uv.html>)

ために日焼け止めを塗ることを考えるとかかりやすいですね。一方、比較的低温の低い物体からは長波放射、つまり赤外線が出ます。テレビなどで、赤外線カメラを使っている暗闇の中で人や物を判別する映像を見たことがある人は多いのではないのでしょうか。これは、カメラが人や地面から放射される赤外線を捕えることで、暗闇でも景色を映し出せるのです。

低温の物体である地球からは常に赤外線が出ていて、地球を冷やそうとしています。これが放射冷

なぜ高い山では気温が低いのか？

次に、高い山で気温が低い原因を探っていきましょう。山に登ると気温が下がるのは、山に登ったことがある人なら経験的に知っているはずです。この理由を知るためには、大気の構造を理解する必要があります。対流圏では1000メートル上がると気温が約6度下がります。どうして上空に行くほど気温が低いのでしょうか。

地球の大気は、窒素が約78パーセント、酸素が約21パーセントと、ほぼこの2つの気体で占められています。それ以外にはアルゴンが約1パーセント、二酸化炭素が0.04パーセントです。皆さんはこの大気に「重さ」を感じたことはあるでしょうか？ おそらくないはずです。少なくとも筆者は感じません。どんなにがんばっても、空気の重さを感じることはできないでしょう。しかし実際には、地球を覆っている空気はかなりの重さを持っています。どれくらいかというところ、1平方メートルあたり、なんと約10トンの重さがかかっています。もしこの重さの荷物を背負ったら、たちまち潰れてしまいますね。ただ、実際の大気の中ではそんなことにはなりません。それは、

人が体内から同じ圧力を外に向かってかけているためです。体の外と中の圧力が釣り合っているために、人は潰れずに地球上で生きていくことができます。

大気の重さは通常、気圧（単位面積あたりに働く力）で表します。地上ではだいたい1013ヘクトパスカルで、これが先ほどの重さに相当します。ヘクトパスカルは日常の天気予報でも使われる気圧の単位です。台風が接近すると、気象キャスターが「台風X号の中心気圧はXXXヘクトパスカル、最大風速は……」などと伝えていきます。以前はヘクトパスカルではなくミリバルという単位を用いていました。1ミリバルは1ヘクトパスカルに等しいのですが、単位系の世界的な移行に伴い、気象庁の表記も1992年12月1日にヘクトパスカルに変更されました。

さて、地上では1013ヘクトパスカルの気圧（1平方メートルあたり約10トンの重さ）がかかっていますが、少し標高が上がればどうなるでしょう。上に移動した分だけ、自分より上にある空気が少なくなるので、大気の重さを感じなくて済みます。つまり気圧が下がります。ざっくりいうと、大気下層では1000メートル上がると気圧が100ヘクトパスカル下がります。人は移動中に空気を取り入れ、体内の圧力

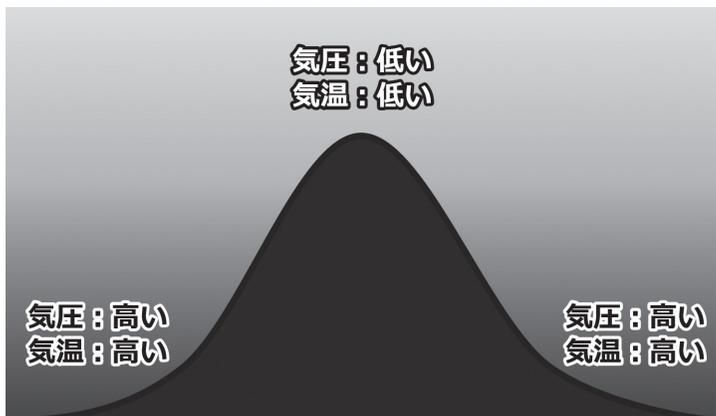


図 1.3 | 気温と気圧の関係

縮された空気（圧力の高い空気）が放出され、スプレー缶の中の圧力が下がります。しかし、スプレー缶の体積は変わらないために、温度が下がります。タイヤの場合、空気を入れることでタイヤの中の気圧が上がるものの、タイヤの体積は変わらない（ゴムが伸びて少しは変わる可能性がありますが）ので、温度が上がります。これを大気に応用してみましよう。地上にある空気を逃がさず同じ体積のまま上空に持ち上げることを考えます。そうすると、上空のほうが地上よりも、上に乗っている空気が少ない（圧力が低い）ために、先ほどの関係を使うと、上空のほうが気温は低くなります（図 1・3）。

と外の気圧を調整しています。ただ、車や飛行機で移動して急に高度を上げると、圧力調整がうまくいかず、耳がキーンとすることがあります。このような経験がある人は多いでしょう。人のように圧力の調整ができないお菓子の袋を上空に持っていくと、袋がパンパンに膨れ上がってしまいます。これは、お菓子の袋の中は地上と同じ気圧（1013ヘクトパスカル）であるにもかかわらず、外側にかかる気圧がこれよりも小さくなるため、袋の中から押す力が強くなるからです。これとは逆に、山の上でふたを開けたペットボトルのふたを閉めて、地上に持っていくと、ペコペコにへこみます。では、気圧が変わることと気温が低くなることは、どのような関係があるのでしょうか？ 高校で物理や化学を習ったことがある人は「ボイル・シャルルの法則」あるいは「気体の状態方程式」という言葉を聞いたことがあるかもしれません。これは、圧力と体積と温度との間には関係があり、圧力は温度に比例し、体積に反比例するという法則です。

例えば、スプレー缶から空気を出すと、スプレー缶が冷たくなります。あるいはタイヤに空気を入れすぎると、タイヤが熱くなってきます。スプレー缶の場合は、圧

日本では富士山の3776メートルが最高峰ですが、世界には標高5000メートルを超える山がいくつも存在します。世界の最高峰は、ヒマラヤ山脈にあるエベレストで、標高8848メートルです。標高6000メートルを超えてくると、赤道域であっても氷点下となります。実際にアフリカ大陸のキリマンジャロ（南緯3度）では雪が降ります。

高度が高いと雪になるのは、山に限ったことではありません。日本でも秋から春にかけては、地上で雨が降っていても、上空は雪や氷の状態で降っている場合がほとんどです。実際に、高層気象観測を行なうバルーンにビデオカメラをつけて飛ばすと（ビデオゾンデ）、雲の中の雪や氷を直接観測することができます。夏に積乱雲が発達して雷雨になることがありますが、これは雲の中の氷が電気を帯びるためです。つまり、積乱雲の中には、真夏であっても氷や雪が存在しているのです。この氷が成長し、融けずに落ちてきたものが「あられ」や「ひょう」です。あられとひょうの違いは大きさだけで、粒の大きさが直径5ミリメートル未満をあられ、5ミリメートル以上をひょうと呼びます。積乱雲の上部には雪も存在していますが、夏の暑い時期に雪が融けず

に落ちてくることはまずありません。ただ、春先の積乱雲からは、雨に混じって融けかけの雪が落ちてくるのが稀にあります。氷や雪が途中で融けて雨粒に変わるこのような雨は「冷たい雨」と呼ばれます。一方、気温が高いときは、雲を構成する水滴（雲粒）が成長して雨粒になり、地上に落ちてくることもあります。これを「暖かい雨」と呼びます。

1.2 日本海側に降る雪

中緯度に位置する日本は、世界でも四季の変化がはっきりしている地域です。季節によって吹く風の向きも変わります。このような季節特有の風を季節風（モンスーン）と呼びます。世界にはいろいろなモンスーンがあります。日本の天候に影響を及ぼす東アジアモンスーンのほか、インドモンスーン、北米モンスーンなどが有名です。

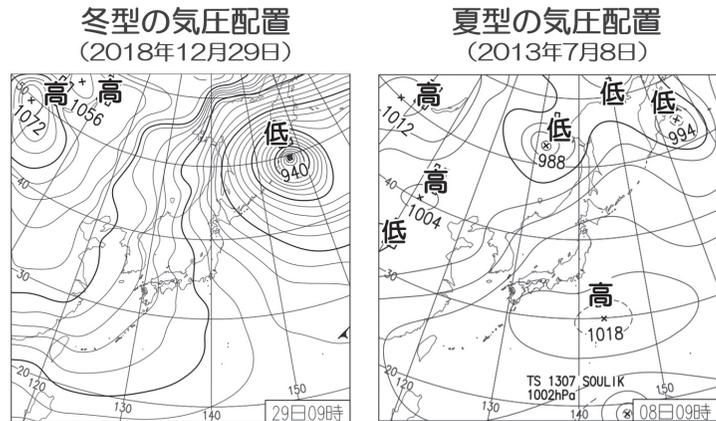


図 1.4 | 冬型と夏型の気圧配置。日々の天気図（気象庁ホームページ）を一部加筆修正。

大雪になるのでしょうか？ そもそも冬型の気圧配置とはどのような気圧配置なのでしょうか？

気圧配置は低気圧や高気圧などの位置関係を示したもので、季節によって特徴的な気圧配置があります。冬型の気圧配置は、いわゆる西高東低の気圧配置です。西高東低はその名の通り、「日本の西で気圧が高く、東で気圧が低い気圧配置」です。これに対し、夏は日本の南に高気圧、北に低気圧や前線が現れる天気図になりやすく、「南高北低」の気圧配置と呼ばれます。いわゆる夏型の気圧配置です（図1・4）。西高東低についてももう少し詳しく見てみましょう。日本の西のシベリ

モンソンは大陸と海の温度差によって生じ、冷たい場所から暖かい場所に向かって吹きます。そのため、大陸が暖まる夏は海から陸へ、大陸が冷える冬は陸から海に吹きます。

ただ、海から陸に向かって（あるいは陸から海に向かって）まっすぐ吹くわけではありません。地球の自転や地形、地表の摩擦の影響で少し曲げられます。例えば、夏の東アジアモンソンは、大陸や日本列島に沿う形で南西風が吹きます。一方、冬の東アジアモンソンは、シベリア大陸から太平洋に向かって吹く北西風です。この冬季東アジアモンソンが日本の冬の降雪に重要な役割を担うこととなります。

気団変質がもたらす日本海側の雪

「日本付近は強い冬型の気圧配置になり、明日は日本海側で大雪となるでしょう」。普段、天気予報を見る（聴く）人であれば、冬に何度もこのような天気解説を耳にするのではないのでしょうか。それではなぜ、強い冬型の気圧配置になると、日本海側で

ア付近で強まる高気圧はシベリア高気圧と呼ばれます。一方、日本の東側で発達するのは温帯低気圧です。温帯低気圧は中・高緯度で発達する低気圧で、前線を伴うこともあります。これに対して、熱帯で発生する低気圧を熱帯低気圧と呼びます。熱帯低気圧は前線を伴いません。熱帯低気圧の中でも勢力が強いもの（最大風速17・2メートル／秒以上）が台風です。

優勢なシベリア高気圧と発達した温帯低気圧に日本が挟まれると、日本付近で単位距離あたりの気圧差（気圧傾度）が大きくなります。つまり、天気図上では等圧線が込み合います。等圧線が込み合った西高東低の気圧配置が、強い冬型の気圧配置です（図1・4左）。風はだいたい等圧線に沿って、気圧の高い側から低い側に向かって吹き、気圧傾度が大きいほど強く吹きます。等圧線が南北に走ることが多い冬型の気圧配置のときは北寄りの風が吹きますが、低気圧や高気圧の位置によっては北風から西風まで変化します。低気圧が北に偏った場合は、西南西の風が吹くこともあります。

冬型の気圧配置のときに吹く北寄りの風は、もともと非常に冷たく乾燥した風です。冬のユーラシア大陸は気温がかなり低く、氷点下20度から氷点下40度以下になること

もあります。また、大陸育ちの空気はほとんど水蒸気を含んでいません。このような大陸の空気を「大陸性寒帯気団」と呼びます。大陸の空気に水蒸気が少ない理由は2つあります。一つは、大陸には海のようなたくさんの水蒸気の供給源がないこと。もう一つは、気温が低すぎて水蒸気をほとんど含むことができないことです。

少し話が逸れますが、ここで水蒸気と気温との関係をお話ししましょう。大気中に含むことのできる水蒸気量は気温に応じて変わり、気温が高いほどたくさんの水蒸気を含むことができます。皆さんも直観的に、大雨は冬よりも夏に降りやすいと感じているのではないでしょうか。夏に時間雨量100ミリや日雨量300ミリの雨が降ることはあっても、冬にこれと同等の雨あるいは雪が降ることはまずありません。気温が高いからこそ、夏の空気は大雨を降らせるようなたくさんの水蒸気を含んでいるのです。気温と大気中に含むことのできる水蒸気量との関係式を、導き出した2人の名前をとって、クラウジウス・クラペイロン（Clausius - Clapeyron）の関係式と呼びます。専門家は頭文字をとってC-C効果と呼ぶこともあります。この関係は本書後半での地球温暖化の話でも出てきますので、頭の片隅に置いておいてください。

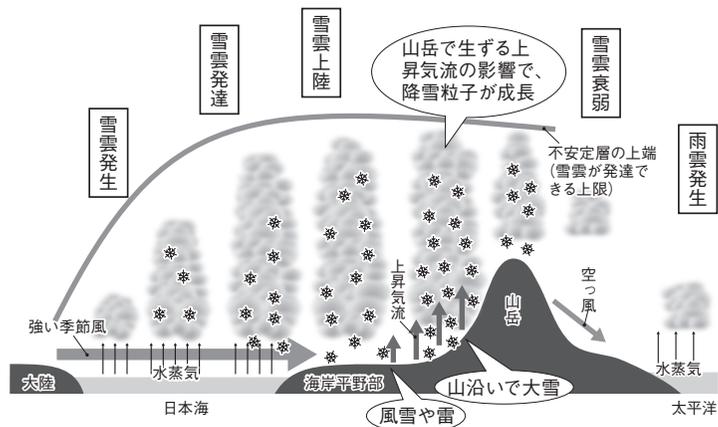


図 1.5 | 気団変質により、日本海で雪雲が発生、発達する様子。主に日本海側の山沿いで雪が降るとき。新潟地方気象台の図を参考に作成 (<https://www.jma-net.go.jp/niigata/menu/kisetsu/tenkou/column02.shtml>)。

します。そのため、大陸の沿岸から筋状の雲の発生位置までの距離は、寒気の強さの目安とされています。強い寒気が流入すると、沿岸近くから筋状の雲ができ、逆に寒気の流れ込みが弱まってくると、筋状の雲が発生する場所が大陸沿岸から離れていきます。

筋状の雲を氣象衛星ひまわりの画像で見ると、その名の通り、まさに一筋の線に見えるのですが、実際は筋状にできているわけではありません。暖かい海の上に冷たい空気が入ると、大気下層に暖かい空気、上空に冷たい空気という状況が発生します。これは大気

さて、このような大陸の乾燥した冷たい空気がそのまま日本にやってきたとしても、おそらく日本海側ではほとんど雪が降らないでしょう。乾燥して寒いだけです。日本海側で雪が降るためには、冬の季節風（冬型の気圧配置）のほかに、もう一つ大事な要素があります。それが日本海の存在です。大陸性寒帯気団は、ユーラシア大陸から日本に来る前に日本海を必ず通ります。このとき、乾燥した冷たい空気が、相対的に暖かい日本海から、多量の水蒸気と熱をもらって湿った空気に変わります。冬、露天風呂から湯気が立っている状況を想像してみてください。暖かいお風呂（日本海）から水が蒸発し、周りの冷たい空気（大陸からの空気）に冷やされて湯気（雲）になります。スケールや温度は違いますが、これと似たようなことが冬の日本海上で起こっています。日本海を通過することで、大陸性寒帯気団の性質が変わることから、この過程を「気団変質」と呼びます（図 1・5）。

気団変質した空気は、日本海上で雲をつくりながら、次々と日本にやってきます。気団変質によって日本海に発生する雲は、その形から筋状の雲と呼ばれます（図 1・6）。筋状の雲は、日本海の水温と大陸から吹き出す寒気との温度差が大きいと発生