

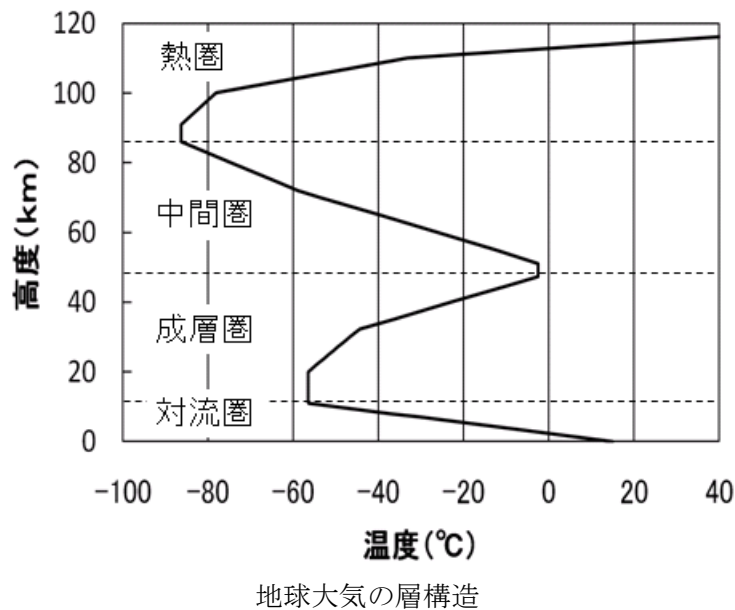
高層気象入門

この講習では、航空機を用いた教員研修に先立って、高層気象について学びます。特に、実況を把握したり航空機から観察したりするための基礎知識を、各種天気図を用いた実習をしながら学習します。

1. 大気の鉛直構造

地球大気の組成は、水蒸気を除くと、地表付近から高度 80 km くらいまではほぼ一定である。体積比で示すと、窒素が約 78 %、酸素が約 21 %、アルゴンが約 1 %、二酸化炭素が約 0.04 %である。

地球大気の鉛直構造をみると層構造をしていることがわかる。地上から約 11 km までは**対流圏**と呼ばれる。雲の発生や降水など、通常よく知られた気象現象が起こるのは対流圏である。対流圏では高度とともに気温は低下する。対流圏の上は**成層圏**である。成層圏は、対流圏とは違って、上にいくほど気温が高い。これは、**オゾン**が紫外線を吸収して加熱されているからである。対流圏と成層圏の境目を**圏界面（対流圏界面）**という。一般の旅客機が飛行するのは、圏界面付近である。成層圏の上には**中間圏**であり、再び高度とともに気温が低下する。中間圏の上は**熱圏**とよばれる。熱圏では、大気は非常に薄く、高度とともに温度が高くなる。なお、固体地球の半径はおよそ 6400 km であり、地球の半径に比べて大気は非常に薄いことがわかる。

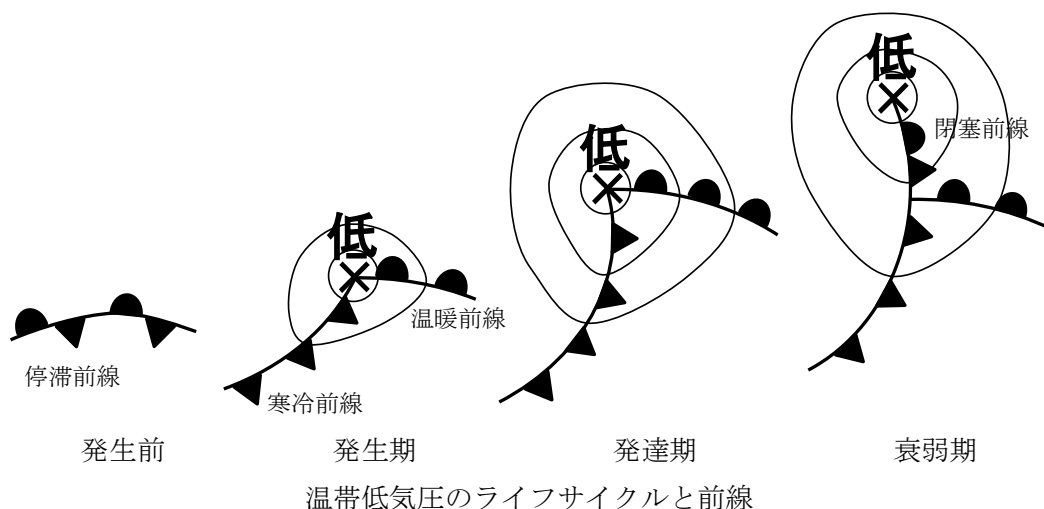


2. 大気のパ力

一般に、上空に行くほど気圧は低くなっている。ここでは、気圧、つまり大気のパ力について考えよう。

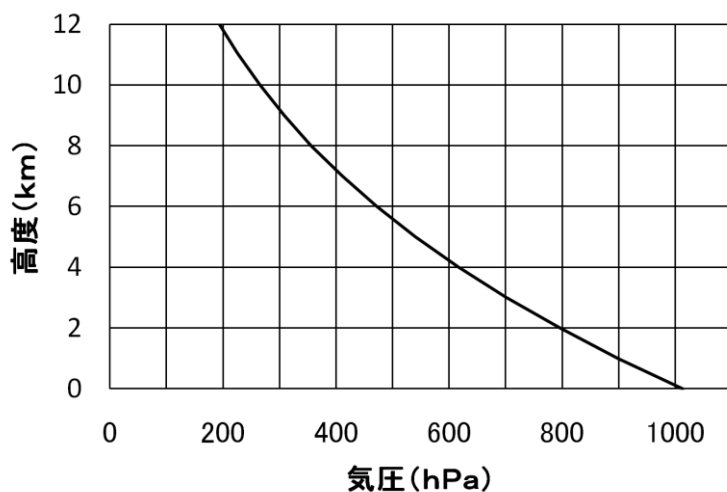
単位面積に加わる空気の重さを**気圧**という。気圧の単位としては**ヘクトパスカル** (hPa) を用いる。1 hPa は 100 Pa であり、1 m² あたり 100 N (約 10 kg 重) の力に相当する。海面付近での平均的な気圧は 1013.25 hPa (1 m² あたり 101325 N) であり、これを **1 気圧** という。1 気圧は 1 cm² あたり約 1 kg 重の重さに相当する。

気圧の分布を考えたとき、気圧がまわりより低い場所を**低気圧**、高い場所を**高気圧**とよんでいる。日々の天気の変化は低気圧や高気圧と密接に関連している。また、寒気と暖気がぶつかっている場所を前線といい、雲が発生しやすくなっている。



- ✓ 地上天気図で、低気圧（や台風）の中心に赤い×印を、高気圧の中心に青い×印をつける。また、温暖前線を赤色、寒冷前線を青色、閉塞前線を紫色の線でなぞる。停滞前線は赤と青の交互の線でなぞる。

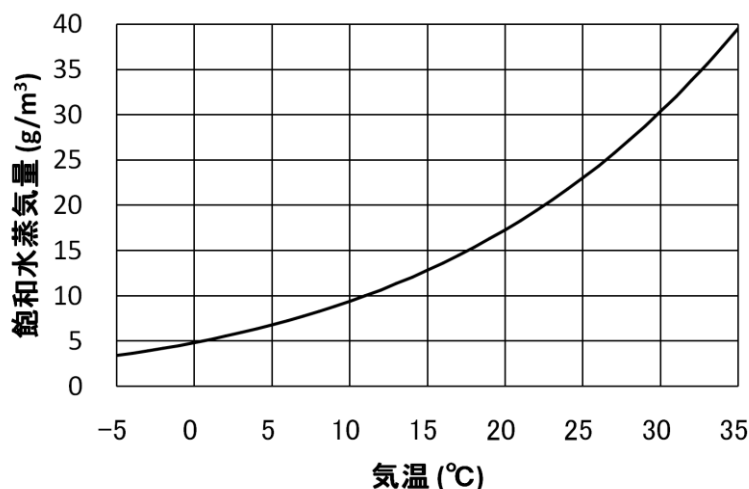
大気中を上に行くと、その区間の空気の重さの分だけ圧力が低下する。実際の大气では、地上付近では、10 m につき約 1 hPa の割合で気圧が低下していく。



3. 大気中の水蒸気

一般に空気には水蒸気が含まれている。空気に含まれている水蒸気が凝結すると雲ができる。ここでは、空気中に含まれている水蒸気について考えよう。

乾燥した空気に含まれる水蒸気の量は少ないが、湿った空気には多くの水蒸気が含まれている。空気を含むことができる水蒸気の量には限界があり、単位体積の空気を含むことのできる水蒸気量（水蒸気の密度）の上限を**飽和水蒸気量**という。飽和水蒸気量は気温が上がると大きくなる。

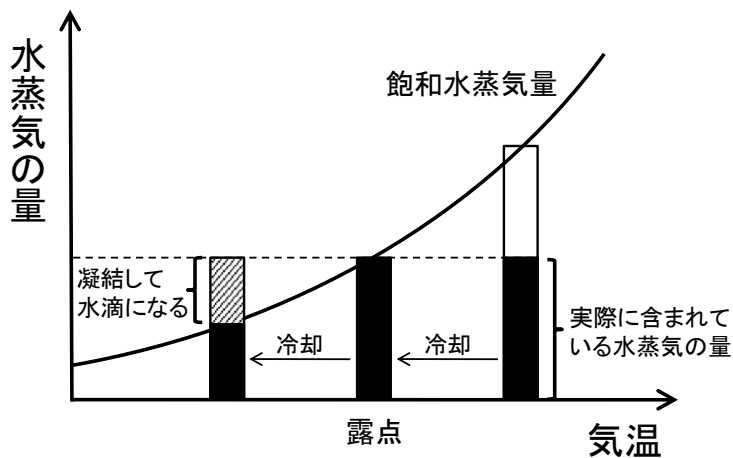


実際に空気中に含まれている水蒸気の量を表すために、さまざまな物理量が使われる。**相対湿度**とは、空気に含まれている水蒸気量の、飽和水蒸気量に対する割合を表したものであり、

$$\text{相対湿度}[\%] = \frac{\text{空気に含まれている水蒸気の密度}[\text{g/m}^3]}{\text{その気温での飽和水蒸気量}[\text{g/m}^3]} \times 100$$

と定義できる。

飽和水蒸気量は気温が下がると小さくなるので、空気が冷却され、空気中に含まれる水蒸気量が飽和水蒸気量よりも大きくなると、水蒸気が凝結して水滴になる。空気を圧力一定の条件のもとで冷却し水蒸気の凝結が始まったときの温度を**露点**という。気温が同じであっても、湿度の高い空気のほうが水蒸気を多く含んでいるので露点は高い。露点が気温と等しいとき、相対湿度は 100 %である。露点は常に気温と同じか低い値を示すが、気温と露点との差を**湿数**とよぶことがある。湿数が 3 °C のときは、相対湿度は約 80 %である。



- ✓ 高層天気図では、湿数が 3°C 以下（相対湿度がおおむね 80 % 以上）の領域に影がつけられている。850 hPa 面（高度約 1500 m）では水色、700 hPa 面（高度約 3000 m）では茶色で塗りつぶして湿潤な場所を把握する。下層雲、中層雲のある領域に対応する。なお、各観測地点の矢羽根は風向、風速を表し、数字は気温と湿数を示している。
- ✓ 地上天気図上で日本付近に低気圧（や台風）があったら、低気圧の中心と、それに伴う前線を 850 hPa 面の高層天気図に描き写す。
 - ☞ 雲は低気圧の中心や前線の付近にできていることや、前線は等温線（点線）の間隔がつかまっている場所（厳密には、間隔がつかまっている場所の南側）に位置していることを確かめる。

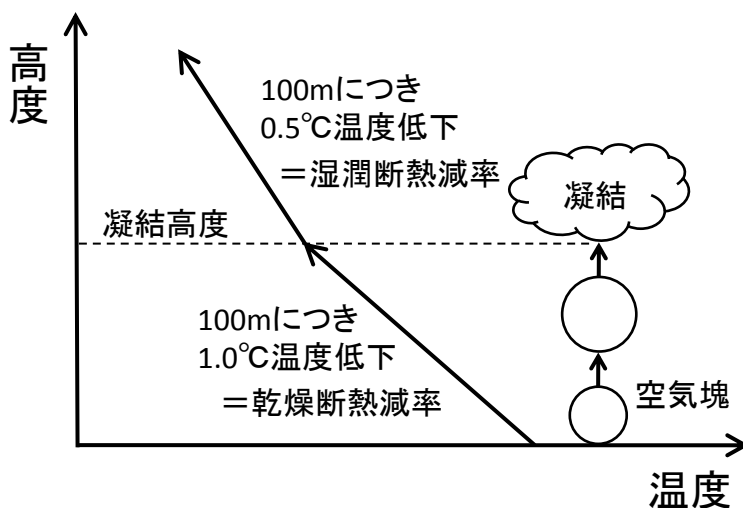
等圧面とおよその高度

等圧面	およその高度
200 hPa	約 12 km
300 hPa	約 9.5 km
500 hPa	約 5.5 km
700 hPa	約 3.0 km
850 hPa	約 1.5 km

4. 大気の温度減率

大気中を空気塊が上昇すると、周囲の気圧の低下とともに膨張する。このとき、空気塊は断熱膨張するので、周りの空気に対して仕事をした分だけ熱エネルギーが減少し、空気塊の温度は低下する。逆に、空気塊が下降すると断熱圧縮されるので、温度は上昇する。飽和に達していない空気塊が断熱的に上昇するときの温度低下の割合はほぼ一定であり、100 m につき約 1.0 °C である。これを**乾燥断熱減率**という。

空気塊の温度が下がると、ある高度で飽和に達し、水蒸気の凝結が始まる。このときの高度を**凝結高度**という。空気塊がさらに上昇を続けると、水蒸気が凝結するときに凝結熱が放出されて空気塊が暖められるので、温度の低下の割合は乾燥断熱減率よりも小さくなる。このときの温度低下の割合を**湿潤断熱減率**という。比較的高温な環境では、湿潤断熱減率は 100 m につき約 0.5 °C である。



空気塊の上昇と断熱減率

実際の大気において、高度による温度低下の割合を**温度減率（気温減率）**という。温度減率は状況によって異なるが、典型的には下層の大気では 100 m につき約 0.6 °C である。

上空の気圧と気温（標準的な値）

高度[km]	気圧[hPa]	気温[℃]
0	1013	15
1	899	9
2	795	2
3	701	−4
4	617	−11
5	540	−17
6	472	−24
7	411	−30
8	357	−37
9	308	−43
10	264	−50
11	227	−56
12	194	−57

5. 雲と降水

雲にはさまざまな種類があるが、以下の表のように 10 種類に分類することがある。これを十種雲形という。

十種雲形

上層雲 (5～13 km)	巻雲	すじ雲
	巻積雲	うろこ雲
	巻層雲	うす雲
中層雲 (2～7 km)	高積雲	ひつじ雲
	高層雲	おぼろ雲
	乱層雲	あま雲
下層雲 (～2 km)	層雲	きり雲
	層積雲	うね雲
下層から 上層の雲	積雲	わた雲
	積乱雲	かみなり雲

これらの雲のうち、降水をもたらすのはおもに**乱層雲**と**積乱雲**である。乱層雲は持続的な降水を、積乱雲は一時的な強い降水をもたらすことが多い。

降水がもたらされるためには、水蒸気が凝結して雲粒が形成され、さらに雨粒や雪の結晶に成長しなければならない。未飽和の空気塊が上昇すると乾燥断熱減率にしたがって温度が低下していく。温度が露点に達すると、水蒸気の凝結が始まり、凝結した水蒸気は水滴となって雲を形成する。水蒸気が冷却されて凝結し、水滴（雲粒）が成長していく過程を**凝結過程**という。凝結過程によって雲粒は直径 0.02 mm 程度まで成長する。それ以後は、雲粒や雨粒の落下速度が大きさによって異なるために、たがいに衝突して雨粒が成長する。この過程を**併合過程**という。併合過程によって雨粒は通常 1 mm 程度、最大で 5 mm 程度まで成長する。雨粒は 4～10 m/s 程度で落下する。

温度が低い場合には、氷の結晶（**氷晶**）ができることがある。しかし、0℃以下であればすべての水滴が凍結するというわけではなく、-20℃程度まで、状況によっては-40℃程度までは、氷晶と**過冷却水滴**が共存している。一般に水面上の飽和水蒸気圧よりも、氷面上での飽和水蒸気圧のほうが低い。このため、水に対しては未飽和であっても氷に対しては過飽和となる。このような条件のもとでは、水滴が蒸発し、氷晶のまわりには水蒸気が昇華して付着する。こうして氷の粒が成長し雪として落下する。

上層に氷晶があっても雪が生成されても、下層が高温であれば、落下の途中で融けて雨になる。このようにしてもたらされる雨を**冷たい雨**という。一方、熱帯地方や夏季の中緯度地方では、氷晶を含まない雲から雨が降ることがある。このようにしてもたらされる雨を**暖かい雨**という。

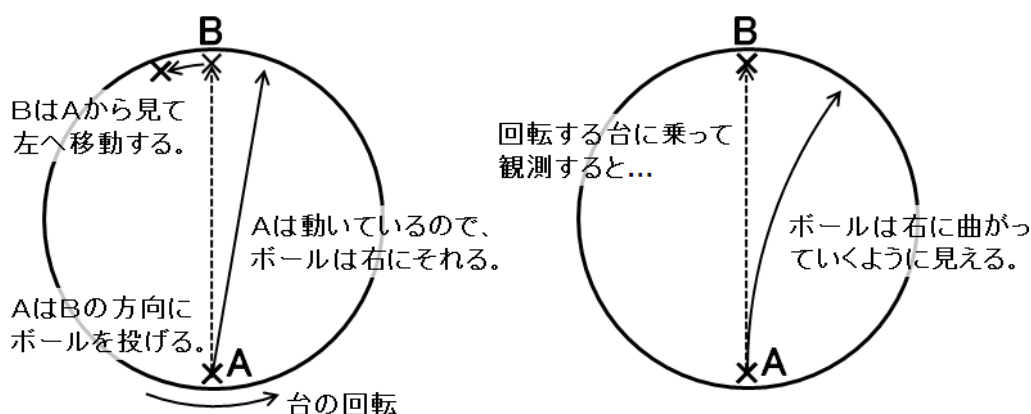
- ✓ 日本付近の降水域を緑色で塗りつぶす。アメダス分布図、レーダー（解析雨量）、雲画像を参考にする。アメダスやレーダーが利用可能な範囲では、それらに従えばよい。それ以外の領域では、雲画像などを参照する。
 - ☞ 雲に伴って雨が降っていることを確かめる。

6. コリオリの力と地衡風

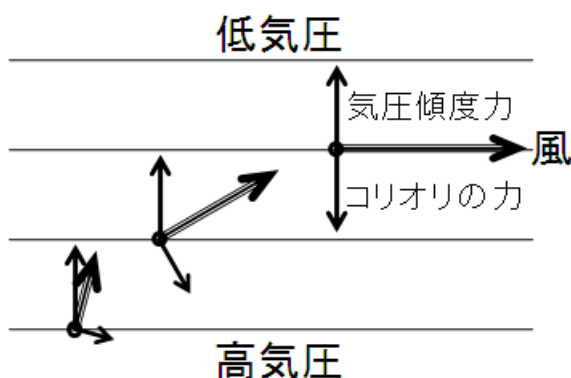
上空では偏西風とよばれる西風が吹いてくる。天気が西から東へ移り変わるのは、低気圧や高気圧が偏西風に乗って移動していくからである。高層天気図では、等圧線を見ることによって、簡単に偏西風の様子を知ることができる。

水平面内に気圧の差があると風が吹く原因となる。気圧の差によって空気塊にはた

らく力を**気圧傾度力**という。気圧傾度力は等圧線と直角に、高圧側から低圧側に向かってはたらく。しかし、地球の自転の影響によって、地球上を運動する空気には**転向力（コリオリの力）**とよばれる力がはたらく。コリオリの力は、北半球では風の吹いていく方向に直角右向きにはたらく。このため、はじめは高圧側から低圧側に吹いていた風は曲げられていき、やがて等圧線と平行に吹くようになる。このような風を**地衡風**という。地面との摩擦が効かない上空を吹く風は、地衡風とみなしてよい。



コリオリの力の原理



地衡風の模式図

なお、専門的な立場からより厳密に考えた場合、地衡風は気圧傾度力とコリオリの力が釣りあっている風に過ぎないので、静止した状態からの時間変化として地衡風を説明することは必ずしも適切ではない。

高層天気図では、等圧線の代わりに等高度線が引かれている。これは、たとえば、気圧が 500 hPa になる高度が何 m であることを示したものである。値が大きいほうが高

気圧である。等圧線と同様のものと考えてよい。上空では、風は等高度線（等圧線）に平行に吹いているので、等高度線は風の流れを表す線（流線）とみなすことができる。流線がもっともつまっている場所がジェット気流（強い偏西風）の軸である。

- ✓ 500 hPa 面、300hPa 面の高層天気図で、ジェット気流の軸を赤線でなぞり、ジェット気流の蛇行の様子を確かめる。
- ✓ 地上天気図上で日本付近に低気圧（や台風）があったら、低気圧の中心と、それに伴う前線を 500 hPa 面の高層天気図に描き写す。
 - ☞ ジェット気流が低気圧の中心付近を通っていることや、低気圧のすぐ西側で南に大きく蛇行していることを確かめる。

天気図や観測データの入手について

過去の天気図、アメダスの観測データは、気象庁のウェブサイトで入手できる。

- 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/obsmenu.html>

過去の天気図 <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>

アメダスの観測データ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

天気図 <http://www.jma.go.jp/jp/g3/>

雲画像 <http://www.jma.go.jp/jp/gms/>

アメダス分布図 <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>

レーダー（解析雨量） <http://www.jma.go.jp/jp/radame/>

} 過去半日～2日程度

また、過去の雲画像は、

- 高知大学気象頁 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>

赤外画像 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/gms.fareast/>

可視画像 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/JPN/>

で入手可能である。さらに、最新の専門的な天気図を入手することができるウェブサイトとしては以下のものが挙げられる。

- 北海道放送 <http://www.hbc.co.jp/pro-weather/>

アーカイブ <http://www.hbc.co.jp/tecweather/archive/index.html> 過去2週間程度

- いであ（株） <http://www.bioweather.net/detailed/rfax.htm>

- 国際気象海洋（株） <http://www.imocwx.com/wxfax.htm>

また、過去の天気図、気象観測データについては、（財）気象業務支援センターでCD-ROMの形で入手できる（有料）。

- （財）気象業務支援センター <http://www.jmbasc.or.jp/>

※学校の授業で利用する場合、使えそうな事例が生じたら、天気図、雲画像、アメダス分布図、レーダー（解析雨量）を気象庁のウェブページから早めにダウンロードしておくのが無難です。過去にさかのぼる場合は、気象庁のウェブページから過去の天気図（1か月でひとまとまりになったPDF形式のファイル）を入手して必要なところを切り出して利用し、雲画像は高知大学気象頁から入手することができます。アメダスや解析雨量については、調べた範囲では無償で入手できるサイトはないようです。