

10 温帯低気圧と傾圧不安定

10.1 低気圧と高気圧

低気圧^中(cyclone)とは周囲より気圧の低いところ、**高気圧**^中(anticyclone)とは周囲より気圧の高いところのことである。**等圧線**^中(isobar)とは天気図上で気圧の等しい場所を結んだ線であるが、低気圧や高気圧のまわりでは等圧線は閉じている。北半球の場合、低気圧のまわりでは風が反時計回りに吹き込み、高気圧のまわりでは時計回りに吹き出す。このように回転成分が生じるのはコリオリ力の影響である(7.1節参照)。一般に、低気圧の付近では上昇気流が生じて雨雲が発達しやすい。逆に、高気圧に覆われると下降気流が生じて雲が発生しにくい。

10.2 温帯低気圧と前線

一般に高緯度の空気は寒冷で、低緯度の空気は温暖であることが多い。また大陸上の空気は乾燥していて、海洋上の空気は湿潤であることも多い。同じ性質を持った空気のことを**気団**^中(air mass)という。**前線面**^中(frontal surface)は異なる気団の境界のことであり、前線面が地表に接している場所を**前線**^中(front)という。前線面では暖かい空気が上昇し雲が発生しやすい。

温帯低気圧^中(extratropical cyclone)は、南北温度勾配のある中緯度域で発生する低気圧で、前線を伴うことが多い。中緯度域では、上空に偏西風とよばれる西風が吹いているが、温帯低気圧は、**偏西風波動**^高(westerly wave)に伴って発生する。一般に、温帯低気圧は偏西風に乗って西から東へ移動する。温帯低気圧の典型的なライフサイクルは下の図のようにになっている。

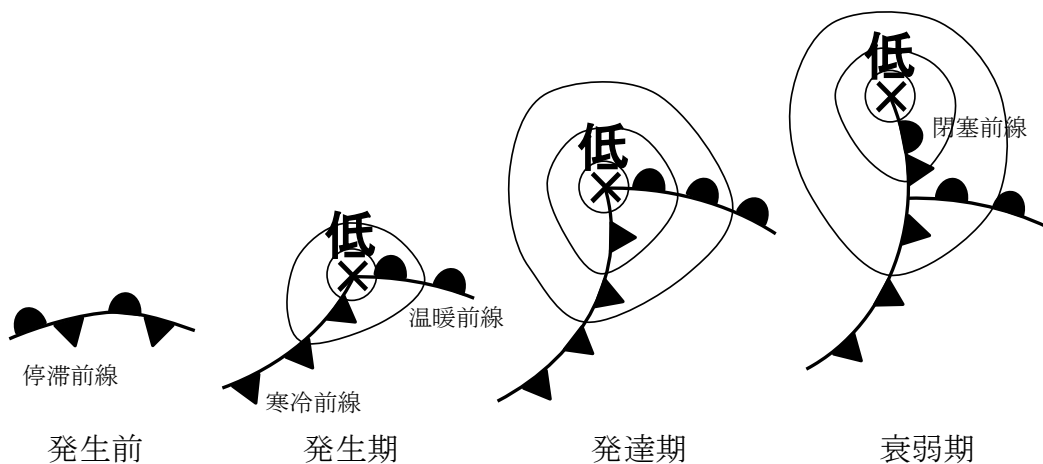


図 10-1: 温帯低気圧のライフサイクル

温帯低気圧は**停滞前線**^中(stationary front)上で発生することが多い。停滞前線は、寒気と暖気が同じ程度の勢力でぶつかっている場所である。前線上で低気圧が発生すると、低気圧の東側では南よりの風が吹き、暖気の勢力のほうが強くなる。このような前線のことを**温暖前線**^中(warm front)という。一方、低気圧の西側では北よりの風が吹き、寒気の勢力のほうが強くなる。このような前線を**寒冷前線**^中(cold front)とよぶ。温帯低気圧は温暖前線と寒冷前線を伴いながら発達する。温暖前線は暖気の勢力のほうが強いので北に、寒冷前線は寒気の勢力のほうが強いので南あるいは南東に移動する。ここで温暖前線よりも寒冷前線の移動のほうが速いことが多いので、やがて寒冷前線は温暖前線に追いつく。こうしてできる前線が**閉塞前線**^中(occluded front)である。

図 10-2 にみられるように、温暖前線付近では南から暖気が流入し、前線面に沿って広い範囲で比較的緩やかな上昇気流が生じている。このため、前線の東側では**巻雲**^中(cirrus)や**巻層雲**^中(cirrostratus)などの比較的薄い上層雲が生じることが多い。前線付近では、**高層雲**^中(altostratus)などのやや厚い雲や乱層雲が発生しやすく、広い範囲で持続的な降水がもたらされる。温暖前線が通過すると気温は上昇するが、昇温が明瞭でないこともある。一方、寒冷前線付近では北から寒気が進入し暖気の下に潜りこんでいるので、前線付近の狭い範囲で強い上昇気流が生じる。このため寒冷前線付近では積乱雲が発達し、狭い範囲で短時間に強い降水が生じる。図 10-3 に示すように、通過後には北寄りの風が吹き、気温が急激に低下することが多い。

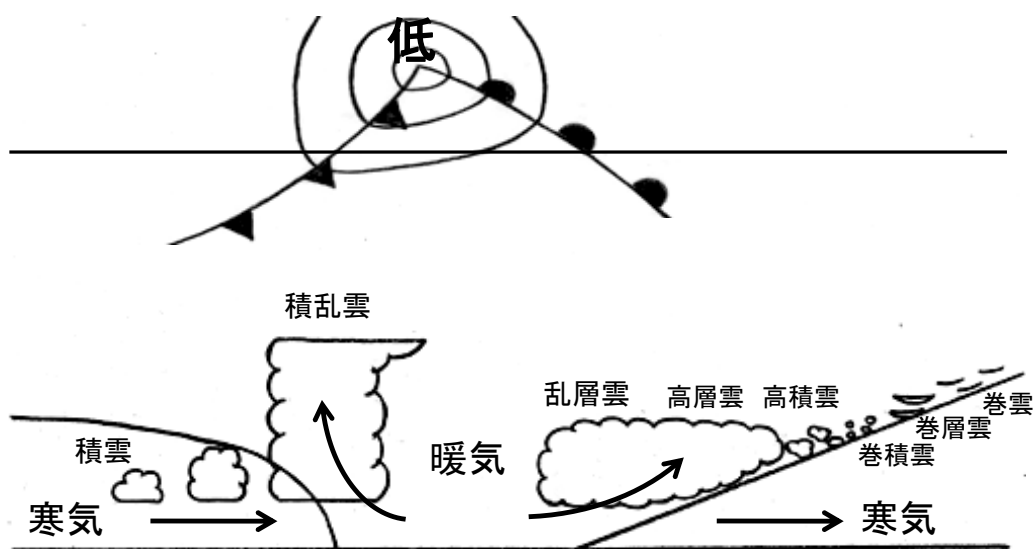
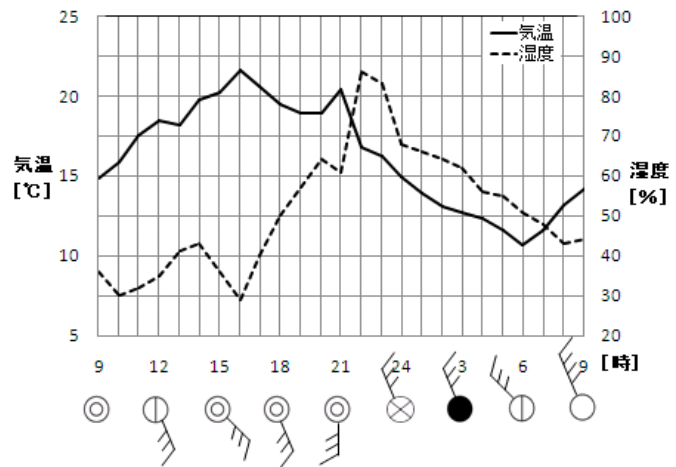


図 10-2: 温帯低気圧の断面



4月28日21時

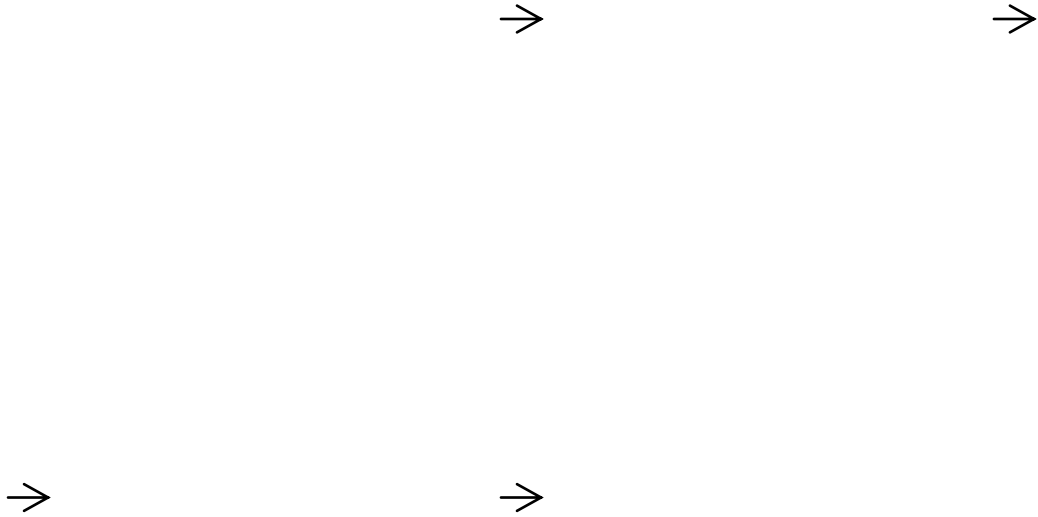


(気象庁のウェブサイトより)

図 10-3: 寒冷前線の通過と天気の変化 (鹿児島、2010年4月28～29日)

- ☞ 小学校の理科で、低気圧の接近、通過に伴う雲の量や種類の変化を学ぶ。低気圧の接近してくるときの雲の変化は、
 薄い雲 (上層雲) → やや厚い雲 (乱層雲以外の中層雲) → 乱層雲
 という流れに従って整理するとよい。観察を通して教えることが望まれる。
- ☞ 小学校や中学校の理科で雲の動きを観察すると、低い高度の雲については、低気圧の東側では南西から北東へ、西側では北西から南東へ移動していることがわかる場合がある。低気圧の通過の前後での風や温度の変化とあわせて理解できるとよい。
- ☞ 小学校の理科においては気温の日変化を測定するが、温帯低気圧や前線の通過に伴う温度変化は中学校の理科第2分野で取り扱う。

温帯低気圧は春や秋によく見られる。図 10-4 のように、春や秋には、温帯低気圧や**移動性高気圧**^甲(migratory anticyclone)が交互に通過することによって、天気が西から東へ周期的に変化することが多い。



(気象庁のウェブサイトより)

図 10-4: 温帯低気圧の移動の例

- ☞ 小学校の理科では天気図や低気圧、高気圧を明示的には取り上げない。しかし、雲画像などを用いて天気が西から東へ変わることを教えており、実質的には温帯低気圧を取り扱っている。

問 10-1 温帯低気圧が北緯 30° の緯度線上を、時速 40km の速さで東に進んでいるとする。1日で経度にして何度東へ進むか。1の位まで求めよ。ただし、地球の子午線(地表面上で北極と南極を結ぶ線)の長さは 20000km とする。また、 $\cos 30^\circ = 0.87$ としよ。

10.3 温帯低気圧の鉛直構造と傾圧不安定

温帯低気圧の発生、発達をもたらす偏西風波動は、**傾圧不安定**(baroclinic instability)とよばれる仕組みによって生じている。低緯度と高緯度の温度差が

大きくなると、温度風の関係により上空に非常に強い偏西風が吹くようになる。しかし、このような状態は安定ではなく、偏西風は波を打ち、蛇行するようになる。この波が**傾圧不安定波**(baroclinic wave)である。

☞ 学術的には偏西風波動というよりは傾圧不安定波という言葉のほうがよく使われる。

以下では、傾圧不安定波の構造を調べてみよう。一般に、北半球の上空においては北に行くほど等圧面高度は低くなっている。このため、偏西風が南に蛇行している場所、つまり、等高度線が南にはり出している場所では、周囲と比べて等圧面高度が低くなっている。これを**気圧の谷**(trough)という。逆に、等高度線が北にはり出している場所では等圧面高度が高くなっていて、これを**気圧の尾根**(ridge)という。気圧の谷は気圧が低い場所であり、地上における温帯低気圧に対応する。同様に、気圧の尾根は移動性高気圧に対応する。気圧の谷と尾根が西から東に移動するのに伴って、温帯低気圧や移動性高気圧も東に移動していく。

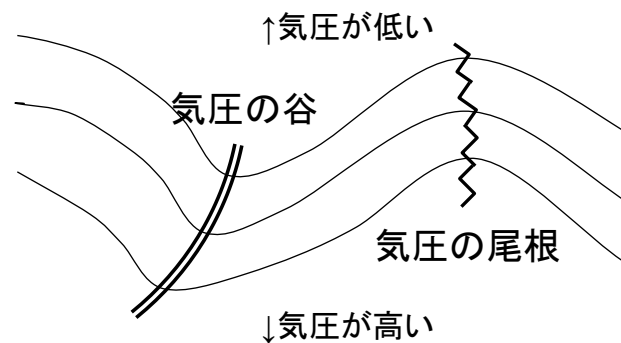


図 10-5: 偏西風の蛇行と気圧の谷・尾根

☞ 気圧の谷という言葉は天気予報でもしばしば耳にするが、気圧の谷、尾根という言葉や、偏西風波動は、高等学校の地学で扱う内容である。

北半球では、気圧の谷（低気圧）の前面（東側）では南よりの風、後面（西側）では北より風が吹く。傾圧不安定が有効に作用し温帯低気圧が発達するような環境下では、南北温度勾配が大きく、赤道側で高温、極側で低温となっている。このため、気圧の谷の東側では暖気移流により正の温度偏差、西側では寒気移流により負の温度偏差が生じる。ここで、静水圧平衡の関係を考えると、同じ高度差でも、温度の高い東側では気圧の低下幅が小さく、逆に西側では気圧の低下幅が大きくなる。したがって、上空に行くにつれて、気圧の谷は西側

にずれていく。

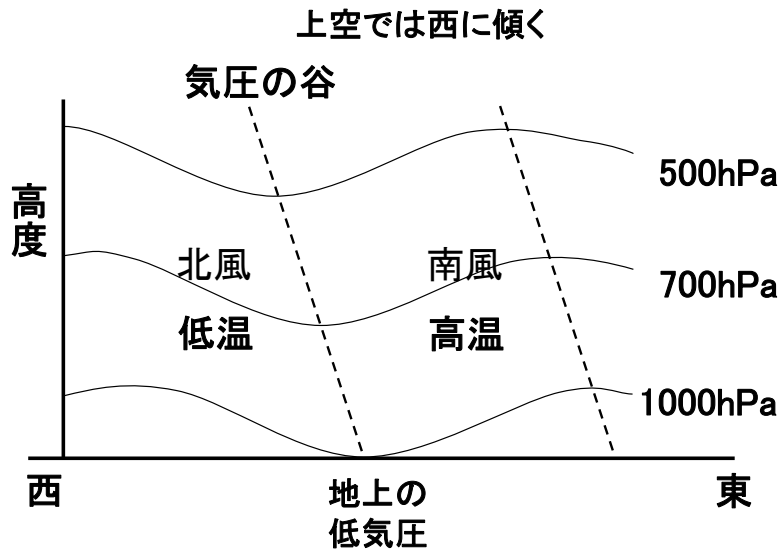


図 10-6: 温帯低気圧と気圧の谷の鉛直断面

このような気圧の谷の傾きと傾圧不安定波の増幅との関係を図を用いて模式的に考えてみよう (図 10-7)。まず、下層の低気圧が上層の低気圧や高気圧に与える影響に着目する。下層の低気圧の東側では南風が吹くので暖気移流が生じて (図中の①)、大気は高温になる (図中の②)。一方、下層の低気圧の西側では北風が吹くので寒気移流が生じて、大気は低温になる。静水圧平衡を考えると、高温偏差は上層に高気圧を、低温偏差は上層に低気圧を作ろうとする (図中の③)。気圧の谷や尾根が傾いていることを考慮すると、上層に高気圧のある場所で、高温偏差が上層の高気圧を強化していて、上層に低気圧のある場所で、低温偏差が上層の低気圧を強化していることがわかる。つまり、下層の低気圧は、上層の高気圧や低気圧をより強めようとしている。下層の高気圧も同様に上層の気圧偏差を強めようとする。逆に、上層の低気圧や高気圧も下層の低気圧や高気圧を強化していることが、同様の考察によって示される。結局のところ、下層の高気圧・低気圧と、上層の高気圧・低気圧は、互いに相手を強化しあっていることになる。これが傾圧不安定の原理である。

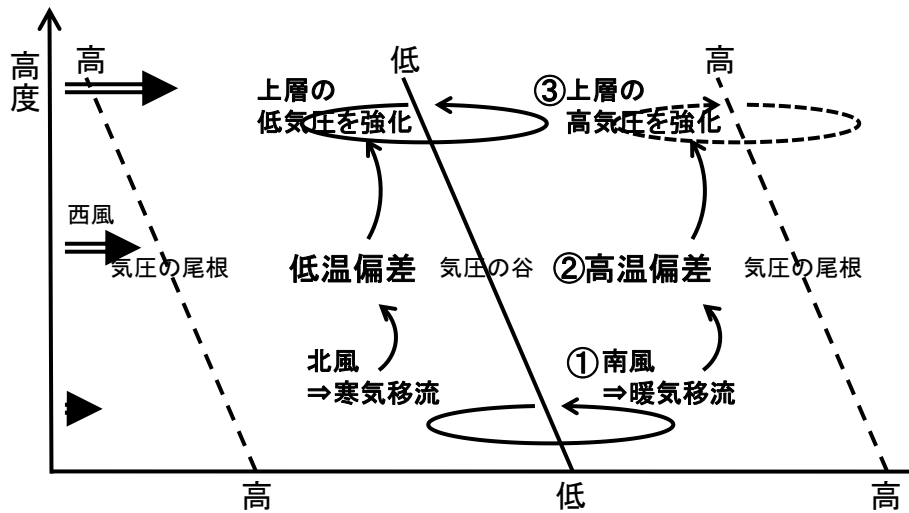
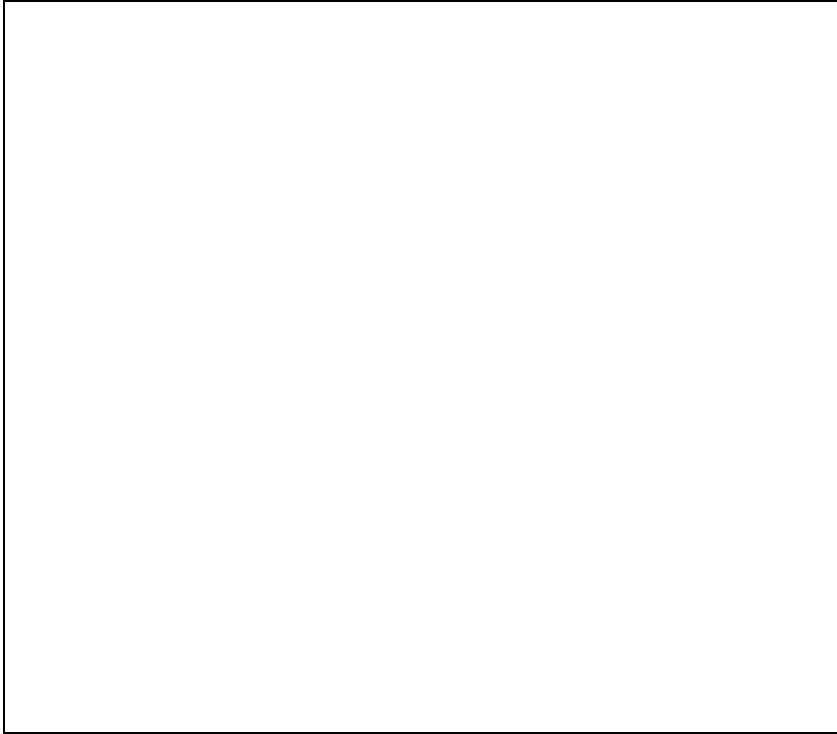


図 10-7: 傾圧不安定の原理

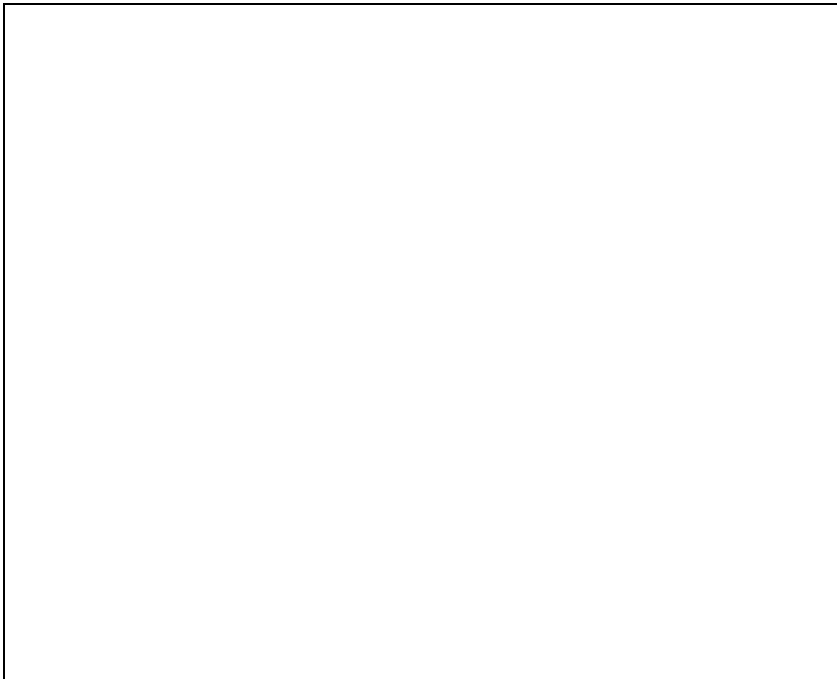
一般に、天気図上において、発達する温帯低気圧には以下のような特徴がみられる。

1. 上空に行くほど気圧の谷が西にずれている。
(地上天気図と 500hPa 天気図)
2. 低気圧の前面で暖気移流、後面で寒気移流が生じている。
(850hPa 天気図)
3. 低気圧の前面で上昇流、後面で下降流が生じている。
(700hPa 鉛直流解析図)

これらの特徴は、南北温度勾配のある環境の中に、低気圧性の循環が存在すると必然的に生じるものである。実は、温帯低気圧のエネルギー源は南北温度勾配にともなう**有効位置エネルギー**(available potential energy) (位置エネルギーの差) であって、発達のためには南北温度勾配が本質的に必要である。逆に、気圧の谷の傾きや、温度移流、鉛直流がみられなくなった温帯低気圧は、それ以上は発達しないで衰弱していくことが多い。

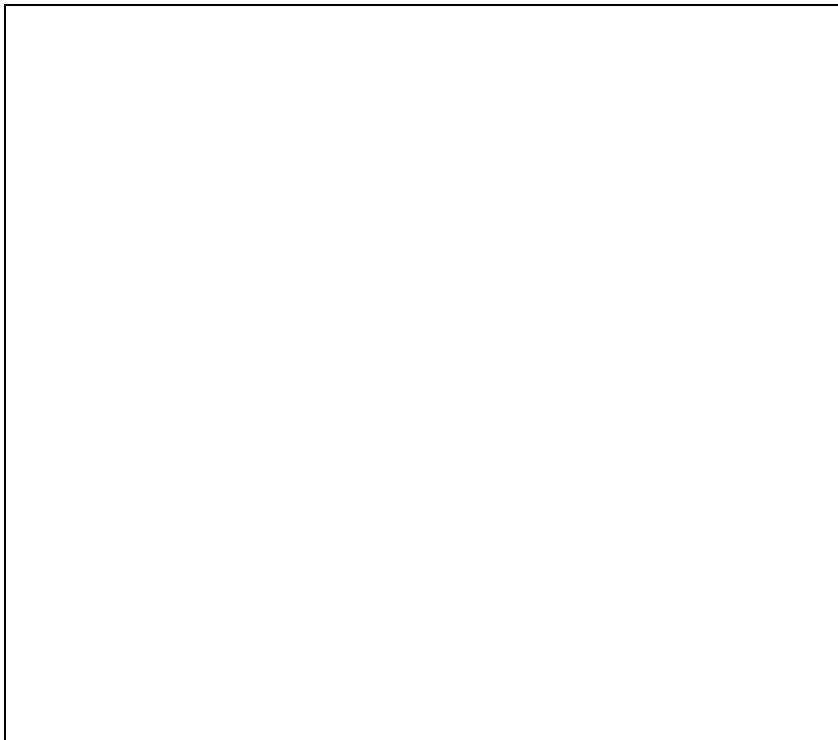


地上天気図



500hPa 天気図

実線は等高度線 (60m ごと)
点線は等温線 (6°C ごと)
矢羽根は風向・風速
上の数字は気温 (°C)
下の数字は湿数 (°C)



850hPa 気温・風、
700hPa 鉛直流解析図
太実線は等温線 (3°Cごと)
細線は鉛直流 (hPa/h)
上昇流域に網かけ

(北海道放送のウェブサイトより)

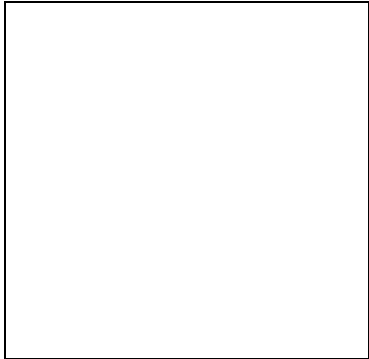
図 10-8: 温帯低気圧通過時の天気図 (2010 年 12 月 21 時)
(上から、地上天気図、500hPa 天気図、
850hPa 気温・風、700hPa 鉛直流解析図)

前線を含めた温帯低気圧の鉛直構造の特徴は、1 地点の高層気象観測データを用いて捉えることもできる。温帯低気圧の周辺における高層気象観測データには以下のような特徴がみられることが多い。

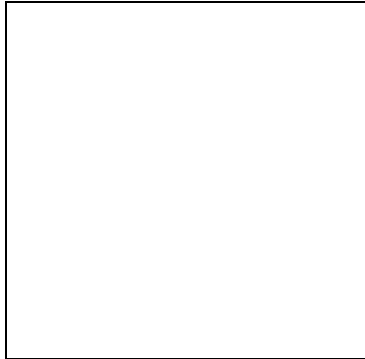
- ・温暖前線の前面においては、暖气移流に伴い、上空に行くにつれて風向が時計回りに変化する。また、温暖前線面が前線逆転層としてみられることがある。前線逆転層の上方は乱層雲のような雲ができていて飽和に近い。
- ・逆に、寒冷前線の後面においては、寒気移流に伴い、上空に行くにつれて風向が反時計回りに変化する。また、寒気内の下降気流に伴って沈降逆転層がみられることがある。沈降逆転層の上方は下降気流が生じていて乾燥している。

問 10-2 下に示した連続する 3 日間 (2011 年 11 月 22~24 日 9 時) の地上天気図 3 枚に対応する高層天気図 (500hPa 天気図) をそれぞれア~エの中から選べ。

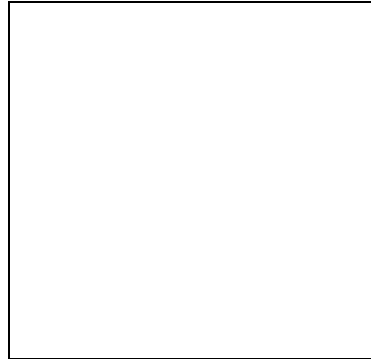
高層天気図においては、実線は等高度線、破線は等温線である。また、観測地点の矢羽根は風向・風速、上の数字は気温、下の数字は湿数をあらわす。



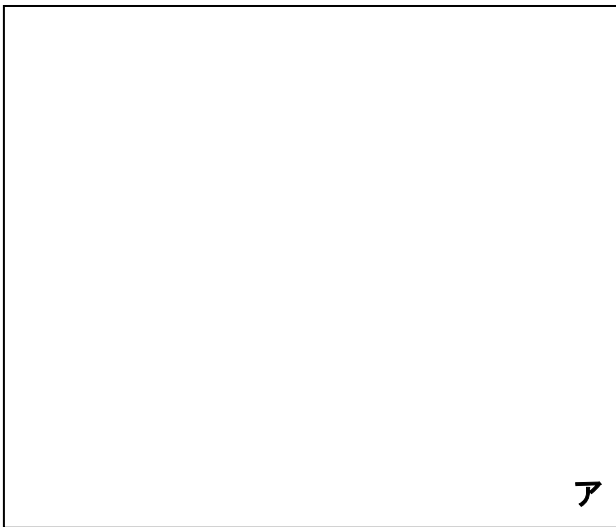
22 日 9 時



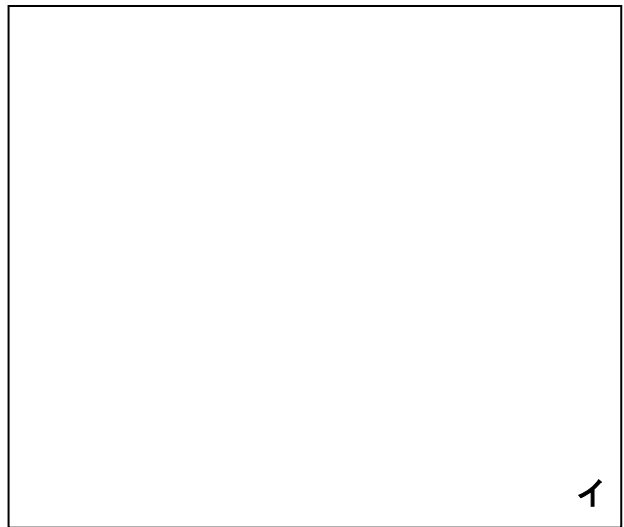
23 日 9 時



24 日 9 時



ア



イ



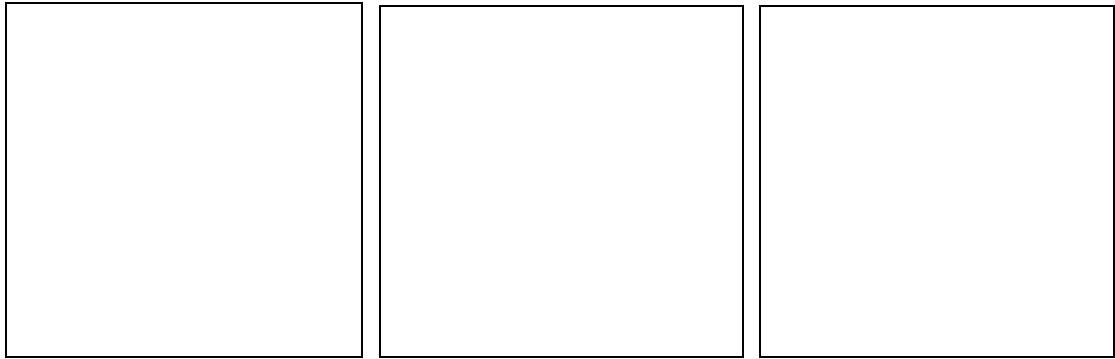
ウ



エ

(北海道放送のウェブサイトより)

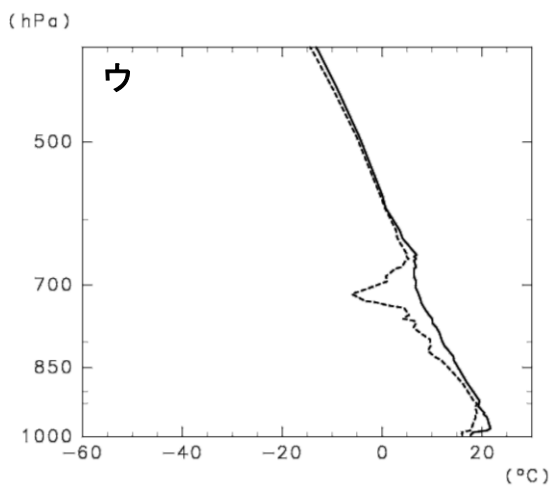
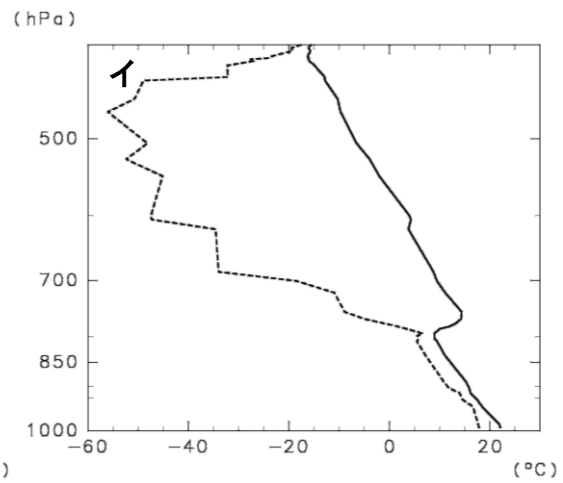
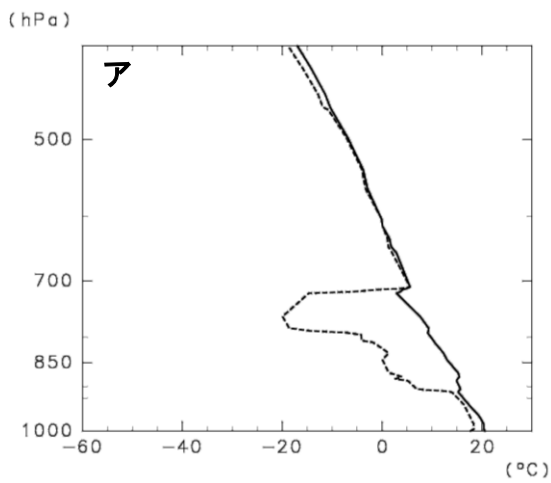
問 10-3 温帯低気圧通過時（2010年5月22～24日21時）の地上天気図3枚に対応する、潮岬（和歌山県、紀伊半島の先端）における高層気象観測データをそれぞれア～ウの中から選べ。実線は気温、破線は露点温度である。



22日21時

23日21時

24日21時



(気象庁のウェブサイトより)