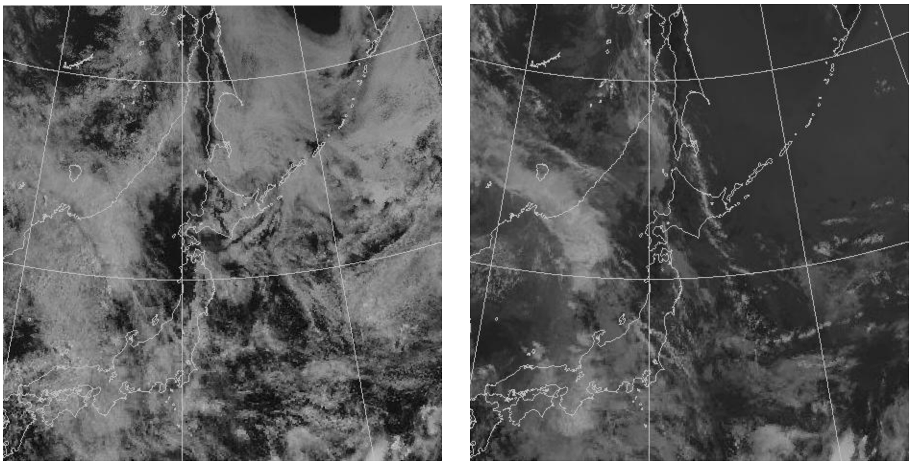
気象学概説（2022 年度秋学期）
最終テスト

１．以下に挙げる４種類の気体を、温度の高いものから順に並べ替えよ。ただし、乾燥空気と二酸化炭素は理想気体であると仮定せよ。乾燥空気の平均分子量は 29、二酸化炭素の分子量は 44 とする。考え方も記せ（たとえば、「…だから、アを基準とすると、イの温度はアの温度の○倍、ウの温度は…」というように簡潔に記せばよい)。

ア．密度 1.0 kg/m^2、圧力 1000 hPa の乾燥空気
イ．密度 1.2 kg/m^2、圧力 1000 hPa の乾燥空気
ウ．密度 1.0 kg/m^2、圧力　990 hPa の乾燥空気
エ．密度 1.0 kg/m^2、圧力 1000 hPa の二酸化炭素

２．以下の図は、2022 年 7 月 14 日 9 時における、気象衛星による可視画像と赤外画像である。オホーツク海は、可視画像では明るく映っているにもかかわらず、赤外画像では暗くなっている。このことから判断できる、この領域の雲の特徴を簡潔に述べよ。



（気象庁による衛星画像を使用）

2022 年 7 月 14 日 9 時の可視画像（左）と赤外画像（右）

３．第２種条件つき不安定について述べた次の文章の空欄Ａ～Ｃに入る語の組み合わせとして適切なものをア～クの中からひとつ選べ。答えのみを記せばよい。

北半球低緯度の海上において、周囲よりも積雲対流が活発な領域があるとする。このような場所では、上昇気流に伴って対流圏下層で水平風が（　Ａ　）するので、（　Ｂ　）の渦度が生じ、（　Ｃ　）が強化される。（　Ｃ　）が強くなると、海面付近の水蒸気を多く含む空気が集まり、ますます積雲対流が活発になる。このようにして、積雲対流が組織的に強化されることによって熱帯低気圧は発生、発達する。この仕組みを第２種条件つき不安定という。

	A	B	C
ア.	発散	正	高気圧
イ.	発散	正	低気圧
ウ.	発散	負	高気圧
エ.	発散	負	低気圧
オ.	収束	正	高気圧
カ.	収束	正	低気圧
キ.	収束	負	高気圧
ク.	収束	負	低気圧

ヒント：東向きに x 軸、北向きに y 軸をとり、西風の風速を u 、南風の風速を v としたとき、渦度 ξ は

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

と定義される。

４．大気を１層で代表して大気の熱収支と温室効果を考える。大気は太陽放射（短波放射）に対しては透明だが、地表面からの地球放射を完全に吸収し、また、黒体放射を射出するものとする。太陽定数をI、地表面のアルベド（反射率）をα、地表面温度をT、大気の温度をT_aとすると、地表面の熱収支は、

$$\frac{1}{4}(1-\alpha)I+\sigma T_a{}^4=\sigma T^4 \qquad ①$$

と書ける。ただし、σはステファン・ボルツマン定数である。地表面はステファン・ボルツマンの法則にしたがって黒体放射を射出するものとしている。一方、大気の熱収支は、

$$\sigma T^4=2\sigma T_a{}^4 \qquad ②$$

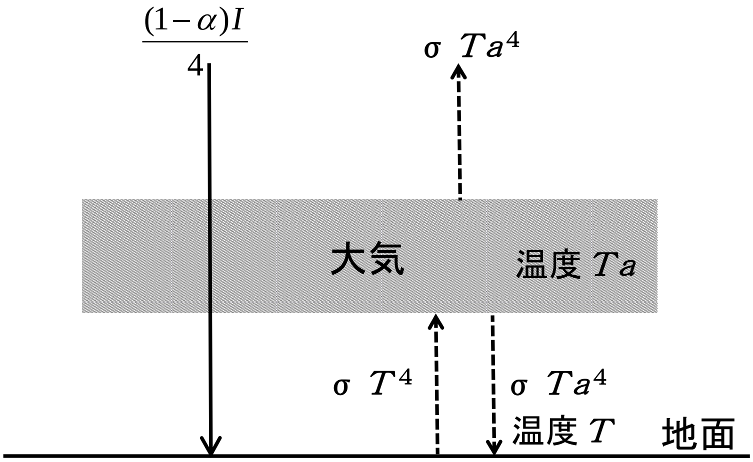
と表せる。①、②から、地表面温度Tと大気の温度T_aを求めると、

$$T=\sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)I}{2\sigma}}=\sqrt[4]{2}T_e, \qquad T_a=\sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)I}{4\sigma}}=T_e \qquad ③$$

である。ただし、T_eは有効放射温度であり、

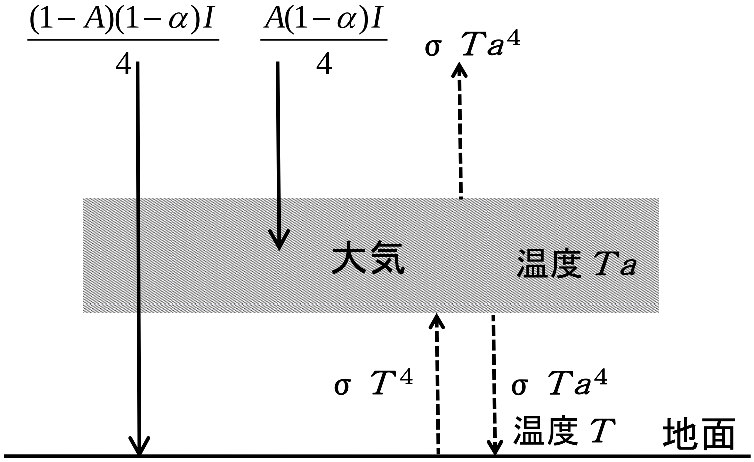
$$T_e=\sqrt[4]{\frac{(1-\alpha)I}{4\sigma}} \qquad ④$$

と定義される。



大気が短波放射に対し透明の場合

次に、大気は太陽放射（短波放射）に対して透明ではなく、正味の太陽放射 $\dfrac{(1-\alpha)I}{4}$ のうち、$\dfrac{A(1-\alpha)I}{4}$ を大気が、残り $\dfrac{(1-A)(1-\alpha)I}{4}$ を地表面が吸収するものとする（$0 \le A \le 1$）。A は大気による太陽放射の吸収率である。このとき、①、②と同様に、地表面の熱収支と大気の熱収支を考えることによって T と T_a を求め、T_e と A で表せ。計算過程だけでなく、計算の根拠となる地表面と大気の熱収支の式を明記すること。



大気が短波放射に対し透明でない場合

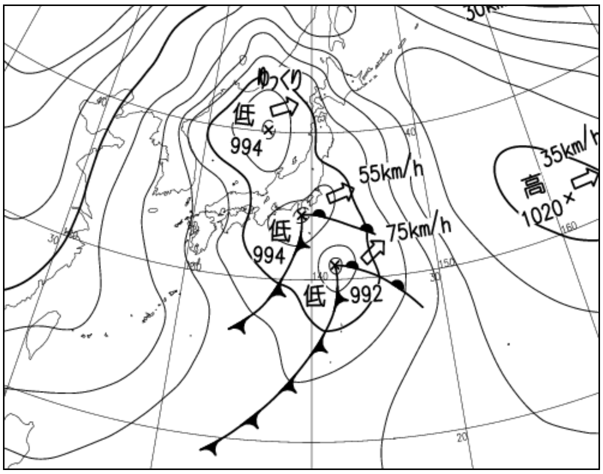
この結果は、大気の透明度の低下が地表面温度を下げる効果を持つことを示している。$A=0$ のときは、当然、③と同じ結果になる。

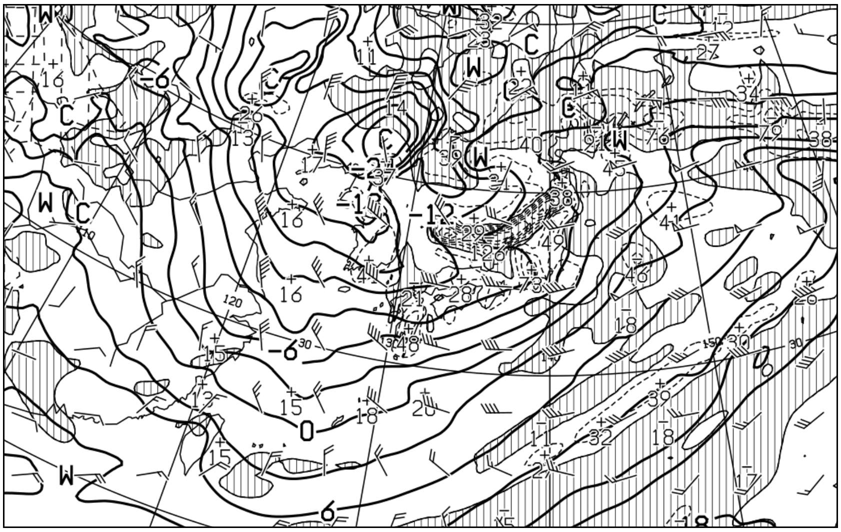
５．以下の高層気象観測データは北半球の中緯度で得られたものである。対流圏下層での温度移流は暖気移流か、それとも寒気移流か。そのように判断した根拠も簡潔に述べよ（表の中のどの要素のどのような傾向に注目したか簡単に記せばよい)。温度風の関係が成り立っていることを前提としてよい。ただし、気温の水平勾配は未知とする（したがって、南／北よりの風だから暖気／寒気移流である、というような解答は正答とは認められない)。風向は０°が北、90°が東である。

気圧 (hPa)	高度 (m)	気温 (℃)	風速 (m/s)	風向 (°)
925	788	0.2	11	310
850	1459	−3.9	16	303
700	2960	−14.6	24	281
500	5478	−23.0	41	272

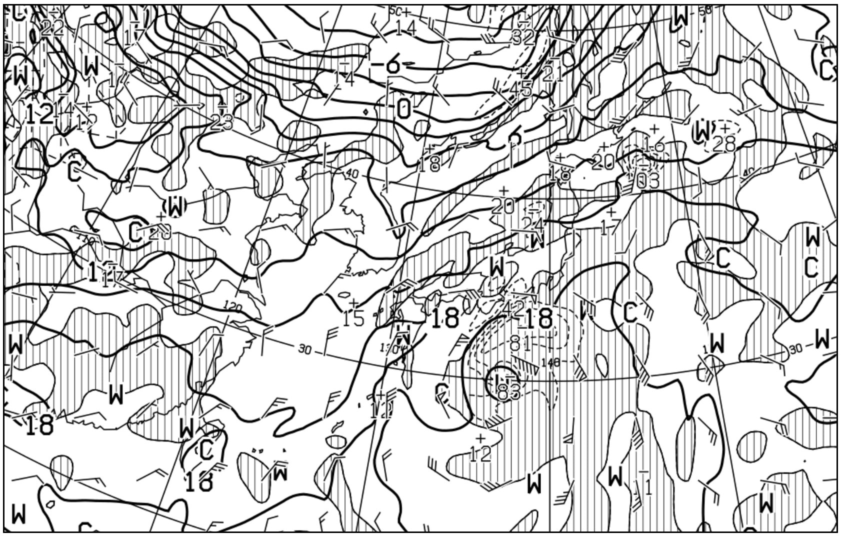
（気象庁のウェブサイトより）

６．次の図は 2022 年 12 月 23 日 9 時の地上天気図である。日本付近を発達中の温帯低気圧が通過している。このときの「850hPa 気温・風、700hPa 鉛直流解析図」をア～ウの中から選び、記号で答えよ。また、判断の根拠となった、(1) 温度場の特徴と (2) 鉛直流場の特徴を簡潔に述べよ。必要に応じ、地上の低気圧の中心との位置関係に言及せよ。本問では記号選択のみ正解の場合には得点は与えられない。

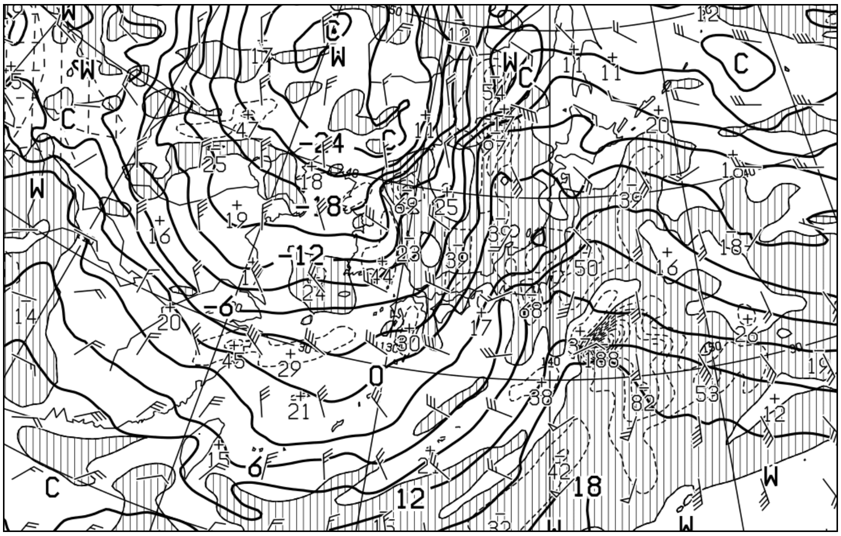




ア



イ



ウ

850hPa 気温・風、
700hPa 鉛直流解析図
太実線は等温線
（3℃ごと）
細線は鉛直流（hPa/h）
上昇流域に網かけ
矢羽根は風向・風速

（気象庁による天気図を使用）

７．地衡風平衡と傾度風平衡に関する以下の問いに答えよ。上空の風を考えているので、地表面との摩擦は考えなくてよい。

（１）北緯 30° において、気圧勾配の大きさ $|\nabla p|$ が 100 km あたり 0.7 hPa であるとする。このとき、地衡風の風速 V は何 m/s か。有効数字１桁で求めよ。地球の自転角速度 Ω を 7×10^{-5} /s、空気の密度 ρ を 0.5 kg/m^3 とする。地衡風の関係を示す公式の導出を含め、計算過程も示すこと。

ヒント：単位質量の空気塊に働く気圧傾度力の大きさは、気圧勾配の大きさを密度で割った値に等しい。また、コリオリ力の大きさは、コリオリ係数と風速との積である。コリオリ係数 f は $f = 2\Omega \sin \phi$（ϕ は緯度）である。

（２）前問で求めた風速 V に等しい風が、低気圧の中心のまわりを反時計回りに吹いている。低気圧の中心からの距離 r は 500 km とする。気圧傾度力とコリオリ力に加えて、遠心力を考慮に入れたとき、これら３つの力がつり合うときの気圧傾度力の大きさは 100 km あたり何 hPa になるか。小数第１位まで求めよ。

ヒント：単位質量の空気塊に働く遠心力の大きさは、回転方向の風速の２乗を中心からの距離で割った値に等しい。

８．温位と乾燥断熱減率について、以下の問いに答えよ。計算過程も示すこと。

（１）温位θは

$$\theta = T\left(\frac{p}{p_0}\right)^{-\frac{R}{C_p}} \qquad ①$$

と定義される。ただし、Tは気温、pは気圧、p_0は基準となる気圧である。また、Rは乾燥空気の気体定数、C_pは定圧比熱である。気温Tと気圧pが高度zの関数であることに注意して（p_0、R、C_pはzによらない正の定数である)、θをzで微分し、$\frac{d\theta}{dz}$を求めよ（T、p、p_0、R、C_p、$\frac{dT}{dz}$、$\frac{dp}{dz}$で表せ)。

ヒント：一般に、

$$\frac{d\theta}{dz} = \left(\frac{\partial\theta}{\partial T}\right)_p \frac{dT}{dz} + \left(\frac{\partial\theta}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dz}$$

である。①について$\left(\frac{\partial\theta}{\partial T}\right)_p$と$\left(\frac{\partial\theta}{\partial p}\right)_T$を計算し、この式に代入せよ。また、$y = x^n$を微分すると$y' = nx^{n-1}$である。

（２）（１）において、$\frac{d\theta}{dz} = 0$とおき、さらに、静水圧平衡の関係

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \qquad ②$$

と、理想気体の状態方程式

$$p = \rho RT \qquad ③$$

を用いて、$\frac{dT}{dz}$を求めよ（C_p、gで表せ)。ただし、ρは密度、gは重力加速度である。符号に注意して解答せよ。

参考までに、地球の対流圏では、$C_p = 1004$ J/kg K、$g = 9.81$ m/s^{2}であり、乾燥断熱減率は 1000 m あたり 10 K 程度であることが知られている。