

2025年2月9日 実施

慶應義塾大学

医学部 一般 物理

(制限時間 理科2科120分)

解答速報

医学部専門予備校



解 答

第1問

$$\text{問1 (a)} \quad \theta = \frac{\pi}{4} (= 45^\circ) \quad \text{(b)} \quad t_1 = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}, \quad \vec{v}_1 = (v_0 \cos \theta, e v_0 \sin \theta)$$

$$\text{(c)} \quad t_n = \frac{2v_0 \sin \theta}{g} \cdot \frac{1 - e^n}{1 - e}, \quad \vec{v}_n = (v_0 \cos \theta, e^n v_0 \sin \theta) \quad \text{(d)} \quad \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{(1 - e)g}$$

問2

(e) ベクレル：放射性物質が1sあたりに放射線を放出する回数

グレイ：放射線を浴びた物体が1kgあたりに放射線から吸収するエネルギーJ

(f) 放射線の種類や被曝する人体の組織ごとに危険性が異なるため

第2問

問1 (a) 常磁性体：③，⑥，強磁性体：①，④，反磁性体：②，⑤

$$\text{(b)} \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^2) \quad \text{(c)} \quad nI \quad \text{(d)} \quad N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

問2 (e) $\boxed{\text{ア}}$ ：ホール効果

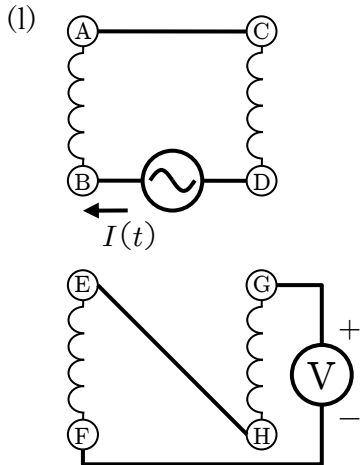
$$\text{問3 (f)} \quad |V_{XY}| = 2\pi f \mu_0 H_0 h^2 |\cos 2\pi ft|$$

$$\text{(g)} \quad f = 2 \times 10^4 \text{ Hz} \quad \text{(h)} \quad F = 6 \times 10^3 \text{ N}$$

(i) 設問(g)で求めたように心臓付近の微小磁場の測定にはコイルの速い回転を要する。伴って設問(h)で求めたようにコイルには強い遠心力が働き、この大きさは体重60kg程度の大人が受ける重力の大きさの10倍程度にもものぼる。0.1m四方で0.010gの小さくて軽いコイルがこの大きな遠心力で破断せず形状を維持するとは考えにくい。ゆえに実現可能性は低いと思われる。

$$\text{問4 (j)} \quad H_1 = nI_0$$

$$\text{(k)} \quad \boxed{\text{イ}} : -3bNSH_0H_1^2\omega, \quad \boxed{\text{ウ}} : -3bNSH_1^3\omega, \quad \boxed{\text{エ}} : (a - 3bH_0^2)NSH_1\omega$$



(m) $3\sqrt{2}bNSH_0H_1^2\omega$

(n) $2 \times 10^{-9} \text{ V}$

第3問

問1 (a) 圧力: $2.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ 物質質量: $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol}$

(b) 圧力: $7.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ 物質質量: $2.9 \times 10^{-5} \text{ mol}$

問2 (c) $A = -\gamma + 1$ $B = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$

問3 (d) $C = \rho g$ (e) $C = \frac{Mpg}{RT}$ ※分子量の定義については解説に記載

(f) $D = \frac{BMg}{R}$ (g) $\Delta T = -1.0 \text{ K}$

(h) 仮想大気層に力のつり合いが成立することと、空気塊の状態変化が断熱変化であることから、空気塊の温度変化は ΔT である。高度変化 Δh における空気塊と大気の密度変化をそれぞれ $\Delta \rho$, $\bar{\Delta \rho}$ とすれば、空気塊が下降する条件は $\Delta \rho > \bar{\Delta \rho}$ である。高度 $h + \Delta h$ において、空気塊と大気の圧力は等しいから $\Delta T < \bar{\Delta T}$ となる。

(i) 高度の上昇に伴う温度低下により水滴が生じるとすれば、温度と飽和蒸気圧関係を表す曲線の傾き $\frac{\Delta p}{\Delta T}$ が、水蒸気を含まない空気の断熱変化における温度と圧力の関係を表す曲線の傾き $\frac{\Delta p}{\Delta T}$ よりも大きい。よって、

$$D = -\frac{\Delta T}{\Delta h} = \rho g \frac{\Delta T}{\Delta p}$$

の値は、水蒸気の凝縮がある場合には小さくなる。

解 説

第1問

問1

- (a) 鉛直方向の等加速度運動を考えれば $t_1 = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$ であり、この時刻の x_1 は、

$$x_1 = v_0 \cos \theta \cdot t_1 = \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

ゆえに、 x_1 を最大とする角度 θ は

$$(\text{答}) \quad \theta = \frac{\pi}{4}$$

- (b) 放物運動において水平方向の速度は変わらない。鉛直方向の速度は反転する。ゆえに1回目の衝突直前の速度は $(v_0 \cos \theta, -v_0 \sin \theta)$ である。衝突によって速度の鉛直成分は $-e$ 倍になる。

$$(\text{答}) \quad t_1 = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}, \quad \vec{v}_1 = (v_0 \cos \theta, e v_0 \sin \theta)$$

- (c) 設問(b)と同様の考察を衝突毎に行えば、

$$\vec{v}_n = (v_0 \cos \theta, e^n v_0 \sin \theta)$$

と表せる。衝突間の時間は衝突直後の小球の速度の y 成分に比例するため、衝突間の時間は公比 e の等比数列である。 t_n はこの等比数列の和として、

$$t_n = \sum_{k=1}^n t_1 e^{k-1} = \frac{2v_0 \sin \theta}{g} \cdot \frac{1 - e^n}{1 - e}$$

$$(\text{答}) \quad t_n = \frac{2v_0 \sin \theta}{g} \cdot \frac{1 - e^n}{1 - e}, \quad \vec{v}_n = (v_0 \cos \theta, e^n v_0 \sin \theta)$$

- (d) 極限をとれば $t_{n \rightarrow \infty} = \frac{2v_0 \sin \theta}{(1 - e)g}$ となる。小球の水平方向の等速度運動を考えれば、時刻 $t_{n \rightarrow \infty}$ での小球の位置 $x_{n \rightarrow \infty}$ は、

$$x_{n \rightarrow \infty} = v_0 \cos \theta \cdot t_{n \rightarrow \infty} = \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - e)g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{(1 - e)g}$$

$$(\text{答}) \quad \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{(1 - e)g}$$

問2

- (e) 放射能の強さと吸収線量の定義より、

(答) ベクレル：放射性物質が1sあたりに放射線を放出する回数

グレイ：放射線を浴びた物体が1kgあたりに放射線から吸収するエネルギーJ

(f) 等価線量と実効線量の定義より、

(答) 放射線の種類や被曝する人体の部位によって危険性が異なるため

第2問

問1

- (a) 常磁性体とは比透磁率が1よりわずかに大きく、外部から与えられた磁場の方向に弱く磁化される アルミニウム や 空気 のような物体である。

③

⑥

強磁性体とは比透磁率が1よりかなり大きく、外部から与えられた磁場の方向に強く磁化される 鉄 や コバルトおよびニッケル のような物体である。

①

④

反磁性体とは比透磁率が1よりわずかに小さく、外部から与えられた磁場と逆の方向に弱く磁化される 銅 や 水 のような物体である。

②

⑤

(答) 常磁性体：③，⑥，強磁性体：①，④，反磁性体：②，⑤

- (b) 磁気量 m の磁荷が大きさ H の磁場から受ける力の大きさは $F = mH$ であることから磁気量の組立単位は Wb (ウェーバ) は、

$$m = \frac{F}{H} \quad \therefore \quad \text{Wb} = \frac{\text{N}}{\text{A/m}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{A/m}} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$$

(答) $\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$

- (c) 十分に長く密に巻かれたソレノイドコイルを流れる電流による磁場は、コイル内部に一様に大きさは nI とみなせる。

(答) nI

- (d) ファラデー則より、コイルの自己誘導起電力の大きさは $N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ である。

(答) $N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

問2

- (e) 導体や半導体内を移動するキャリアが磁場から力を受けることで電圧が生じる現象を ホール効果 という。

ア

(答) ア：ホール効果

問3

- (f) コイルの回転の角速度は $2\pi f$ であり、コイル面を貫く磁束 Φ は、

$$\Phi = \mu_0 H_0 h^2 \sin 2\pi f t$$

と表せる。ゆえに Y を基準とした X の電位としてコイルに生じる誘導起電力は、ファラデー則より、

$$V_{XY} = \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f\mu_0 H_0 h^2 \cos 2\pi ft$$

$$(\text{答}) |V_{XY}| = 2\pi f\mu_0 H_0 h^2 |\cos 2\pi ft|$$

(g) V_{XY} の実効値を V_e とすれば、

$$V_e = \sqrt{2}\pi f\mu_0 H_0 h^2 \quad \therefore f = \frac{V_e}{\sqrt{2}\pi\mu_0 H_0 h^2} \doteq 2 \times 10^4 \text{ Hz}$$

$$(\text{答}) f = 2 \times 10^4 \text{ Hz}$$

(h) 導線一辺の質量を m とすれば、

$$F = m \frac{h}{2} (2\pi f)^2 = 2\pi^2 m h f^2 \doteq 6 \times 10^3 \text{ N}$$

$$(\text{答}) F = 6 \times 10^3 \text{ N}$$

(i) 解答の通りである。

問 4

(j) 電流によりコア内に生じる磁場 H_{cur} は図の上向きを正として、

$$H_{\text{cur}} = nI = \frac{nI_0 \sin \omega t}{H_1}$$

$$(\text{答}) H_1 = nI_0$$

(k) 新たに巻いた別なコイルは電圧計測器に接続されているだけであるから、この別なコイルには電流は流れないとみなす。交流電流が流れるコイルによって別なコイル内部に生じる磁場の磁束密度 B は上向きを正として、

$$B = a(H_0 + H_1 \sin \omega t) - b(H_0 + H_1 \sin \omega t)^3$$

ファラデー則より、別なコイルに生じる相互誘導起電力は F を基準とした E の電位として、

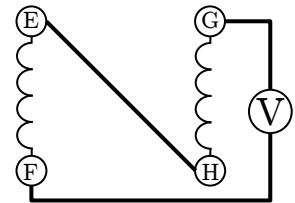
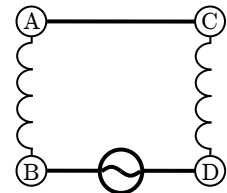
$$\begin{aligned} V_{EF} &= N \frac{d}{dt}(BS) = NS \left\{ aH_1 \omega \cos \omega t - 3b(H_0 + H_1 \sin \omega t)^2 H_1 \omega \cos \omega t \right\} \\ &= \left\{ a - 3b(H_0^2 + 2H_0 H_1 \sin \omega t + H_1^2 \sin^2 \omega t) \right\} NSH_1 \omega \cos \omega t \\ &= \underbrace{-3bNSH_0 H_1^2 \omega \sin 2\omega t}_{\text{イ}} \\ &\quad + \cos \omega t \left\{ \underbrace{-3bNSH_1^3 \omega \sin^2 \omega t}_{\text{ウ}} + \underbrace{(a - 3bH_0^2)NSH_1 \omega}_{\text{エ}} \right\} \end{aligned}$$

$$(\text{答}) \text{イ} : -3bNSH_0 H_1^2 \omega, \text{ウ} : -3bNSH_1^3 \omega, \text{エ} : (a - 3bH_0^2)NSH_1 \omega$$

※問われているのは絶対値なのですべてを異符号で書いた場合も正解である

- (l) コイルに流す電流の向きを逆転させれば H_1 の符号が反転する。このとき $\boxed{イ}$ が係数の項は符号反転せず、 $\boxed{ウ}$ が係数の項と $\boxed{エ}$ が係数の項は符号反転する。 H_1 が正の場合の相互誘導起電力と H_1 が負の場合の相互誘導起電力を直列して電圧測定器で計測すれば、 $\boxed{イ}$ が係数の項のみが現れる。次図は適当に解答欄を仮定した解答である。

(答)



- (m) 設問(l)の接続ならば、電圧計測器には $\boxed{イ}$ が係数の項のみが強め合って現れるため、電圧の最大値は $3bNSH_0H_1^2\omega \times 2$ であり、実効値 V'_e は、

$$V'_e = 3\sqrt{2}bNSH_0H_1^2\omega$$

(答) $3\sqrt{2}bNSH_0H_1^2\omega$

- (n) $H_1^2 = \frac{a}{3b}$ ならば、

$$V'_e = 3\sqrt{2}bNSH_0\frac{a}{3b}\omega = \sqrt{2}NSH_0a\omega \doteq 2 \times 10^{-9} \text{ V}$$

(答) $2 \times 10^{-9} \text{ V}$

第3問

問1

- (a) 図1より $T = 80^\circ\text{C} = 353\text{K}$ で $p = 4.75 \times 10^4\text{Pa}$ である。容器内の水がすべて水蒸気になっていると仮定すれば、水蒸気の状態方程式より、

$$p = \frac{n_0 RT}{V} = \frac{1.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot 8.3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 353 \text{ K}}{10 \text{ cm}^3} = 2.9 \times 10^4 \text{ Pa}$$

であり、飽和水蒸気圧を下回っている。よって、容器内の水はすべて水蒸気となっており、その圧力は $p = 2.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ である。

(答) 圧力： $2.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ ，物質質量： $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol}$

- (b) 図1より $T = 40^\circ\text{C} = 313\text{K}$ で $p = 7.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ である。容器内の水がすべて水蒸気になっていると仮定すれば、水蒸気の状態方程式より、

$$p = \frac{n_0 RT}{V} = \frac{1.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot 8.3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 313 \text{ K}}{10 \text{ cm}^3} = 2.6 \times 10^4 \text{ Pa}$$

であり、飽和水蒸気圧を上回っている。よって、容器内の圧力は飽和水蒸気圧に一致する $p = 7.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ であり、水蒸気の物質質量 n は、

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{7.5 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot 10 \text{ cm}^3}{8.3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 313 \text{ K}} = 2.9 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

(答) 圧力： $7.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ ，物質質量： $2.9 \times 10^{-5} \text{ mol}$

問2

- (c) 断熱変化で成立するポアソン則 $pV^\gamma = (\text{一定})$ とボイル・シャルル則 $\frac{pV}{T} = (\text{一定})$ から V を消去すると $p^{-\gamma+1}T^\gamma = (\text{一定})$ を得る。微小断熱変化に適用すれば、

$$(p + \Delta p)^{-\gamma+1} (T + \Delta T)^\gamma = p^{-\gamma+1} T^\gamma \quad \therefore \left(1 + \frac{\Delta p}{p}\right)^{-\gamma+1} \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)^\gamma = 1$$

近似して、

$$\left\{1 + (-\gamma+1) \frac{\Delta p}{p}\right\} \left\{1 + \gamma \frac{\Delta T}{T}\right\} - 1 = 0 \quad \therefore \Delta T = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{p} \Delta p$$

以上の結果を、 $p^A T^\gamma = (\text{一定})$ ， $\Delta T = B \frac{T}{p} \Delta p$ と比較すると、

$$(\text{答}) \quad A = -\gamma + 1, \quad B = 1 - \frac{1}{\gamma}$$

問3

- (d) 厚さ Δh の大気層の、水平な面積 S の領域を考え、重力と上下の大気圧差による力のつり合いを記述すれば、

$$pS = \rho S \Delta h \cdot g + (p + \Delta p)S \quad \therefore \Delta p = -\rho g \Delta h$$

$$(\text{答}) C = \rho g$$

(e) 本来平均分子量 M は無次元・無単位であるが、ここでは単位物質あたり質量と解釈すれば(そうしないと M の代わりに $M \text{ g/mol}$ を延々と書き込み続けなければならないことになるため、題意ではないと柔軟に判断した)、密度 ρ は、

$$\rho = \frac{nM}{V}$$

である。状態方程式より $\frac{n}{V} = \frac{p}{RT}$ であるから、

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad \therefore C = \rho g = \frac{Mpg}{RT}$$

$$(\text{答}) C = \frac{Mpg}{RT}$$

問4(f) 問2の式に、問3(e)の結果を代入して、

$$\Delta T = B \frac{T}{p} \cdot \left(-\frac{Mpg}{RT} \right) \Delta h = -\frac{BMg}{R} \Delta h \quad \therefore D = \frac{BMg}{R}$$

この D は乾燥気温減率(乾燥断熱減率)と呼ばれている。

$$(\text{答}) D = \frac{BMg}{R}$$

(g) $M = 29$ とあるが $M = 29 \times 10^3 \text{ kg/mol}$ として設問(f)の式に、 $B = 0.29$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $M = 29 \times 10^3 \text{ kg/mol}$, $\Delta h = 1.0 \times 10^2 \text{ m}$ を代入して、

$$\Delta T = -\frac{0.29 \cdot 29 \times 10^{-3} \cdot 10}{8.3} \cdot 1.0 \times 10^2 \text{ K} = -1.0 \text{ K}$$

となる。この計算の通り、乾燥大気では100m上昇するごとに気温が約1K低下する。

$$(\text{答}) \Delta T = -1.0 \text{ K}$$

(h) 何を前提としたモデルなのかが把握できていないと簡潔に説明することは難しい。前提を明確にするため、まずは状態量を整理する。

高度 h における大気および空気塊の圧力を p , 密度を ρ , 温度を T とする。

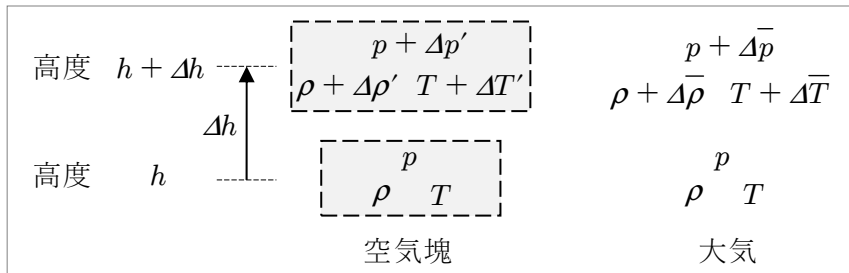
□ ΔT の定義の確認とこれに付随する状態変化の定義

大気温の高度変化に外的要因がない場合の、高度 $h + \Delta h$ における大気の温度が $T + \Delta T$ であると設問により定められている。この場合の高度 $h + \Delta h$ における大気の圧力を $p + \Delta p$, 密度を $\rho + \Delta \rho$ とする。

□ $\overline{\Delta T}$ の定義の確認とこれに付随する状態変化の定義

大気温の高度変化に外的要因がある場合の、高度 $h + \Delta h$ における大気の温度が $T + \overline{\Delta T}$ であると設問により定められている。この場合の高度 $h + \Delta h$ における大気の圧力を $p + \overline{\Delta p}$, 密度を $\rho + \overline{\Delta \rho}$ とする。

高度 h から空気塊が高度 $h + \Delta h$ まで上昇するとき、高度 $h + \Delta h$ における空気塊の圧力を $p + \Delta p'$ 、密度を $\rho + \Delta \rho'$ 、温度を $T + \Delta T'$ とする。



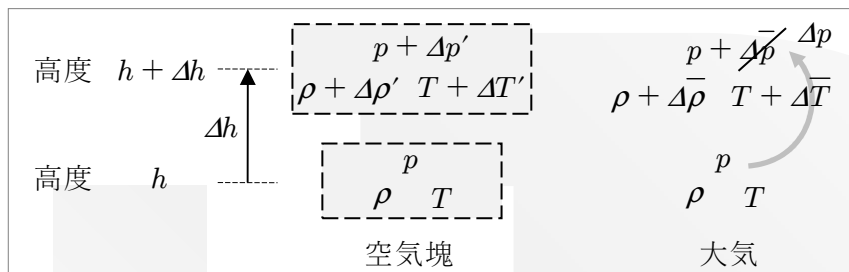
以下は、大気温の高度変化に外的要因がある場合の、空気塊と大気の状態変化に関する考察である。

□ 大気層の力のつり合い

大気温の高度変化に外的要因がある場合においても、あらゆる高度において大気各層には力のつり合いが成立していなければならない。そうでなければ静的な大気とはいえない。すなわち

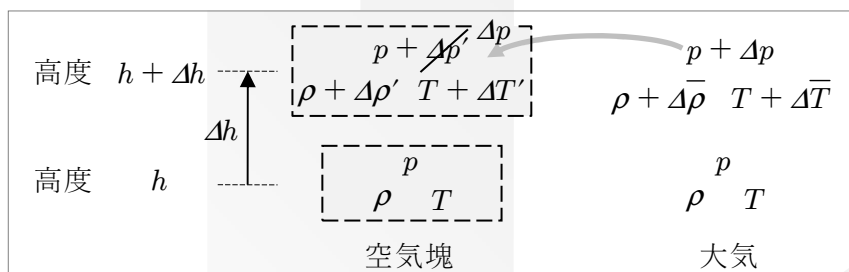
$$\text{力のつり合い: } p + \Delta \bar{p} + \rho g \Delta h = p$$

となる。これは大気温の高度変化に外的要因がない場合の力のつり合いと同じ式である。ゆえに $\Delta \bar{p}$ は大気温の高度変化に外的要因がない場合の圧力変化 Δp に等しいことがわかる。



□ 空気塊と大気の圧力は等しい

空気塊の上昇過程においては空気塊の境界において周囲の大気とのつり合いが常に成立する。高度 $h + \Delta h$ における空気塊と大気の圧力が等しいことから $\Delta p'$ は Δp に等しいことがわかる。

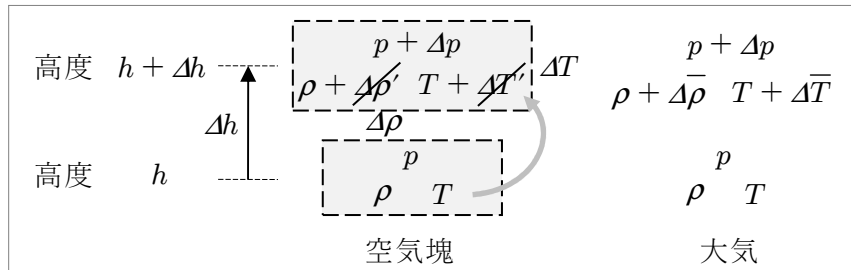


□ 空気塊の状態変化は断熱膨張

空気は熱を伝えにくいので、風などの影響で上昇した空気塊の状態変化は断熱変化である。上昇において大気圧力は下がるため、上昇過程では大気と圧力を常に等しく保ちながら断熱膨張していくことになる。断熱変化においてはポアソンの法則 $p^{-\gamma+1}T^{\gamma} = (\text{一定})$ が成立する。ここで空気塊の上昇におけるポアソンの法則は、

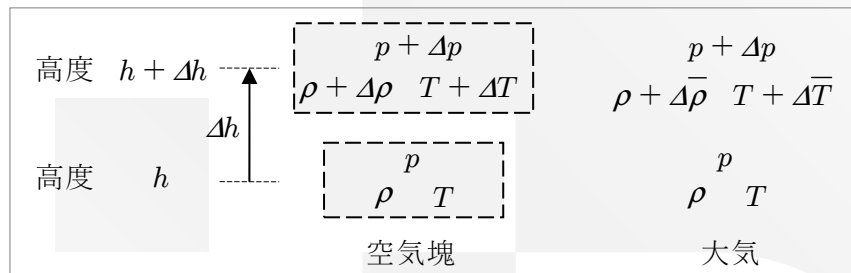
$$\text{ポアソンの法則：} (p + \Delta p)^{-\gamma+1} (T + \Delta T')^{\gamma} = p^{-\gamma+1} T^{\gamma}$$

となる。これは大気温の高度変化に外的要因がない場合のポアソンの法則と同じ式である。ゆえに $\Delta T'$ は大気温の高度変化に外的要因がない場合の温度変化 ΔT に等しいことがわかる。同時に状態方程式 $\frac{p}{\rho T} = (\text{一定})$ より、 $\Delta \rho'$ も気温の高度変化に外的要因がない場合の密度変化 $\Delta \rho$ に等しいことがわかる。



□ ΔT と $\Delta \bar{T}$ の比較

以上の状態量に関する状況の整理から、気温の高度変化に外的要因がある場合の各高度における空気塊と大気の状態量をまとめると次図のようになる。



ΔT と $\Delta \bar{T}$ の大小関係を定めるのは風で上昇した空気塊が復元力を受けるという条件である。高度 $h + \Delta h$ において体積 V の空気塊が大気から受ける浮力は上向きに $(\rho + \Delta \bar{\rho})Vg$ 、重力は下向きに $(\rho + \Delta \rho)Vg$ であるから、

$$\text{復元条件：} (\rho + \Delta \bar{\rho})Vg < (\rho + \Delta \rho)Vg$$

状態方程式 $\frac{p}{\rho T} = (\text{一定})$ を高度 $h + \Delta h$ での空気塊と大気間に適用すれば、

$$\text{状態方程式：} (\rho + \Delta \bar{\rho})(T + \Delta \bar{T}) = (\rho + \Delta \rho)(T + \Delta T)$$

以上2式から密度を消去すれば $\Delta T < \Delta \bar{T}$ を得る。

□ 本設問で導いた関係式の意味

Δh が正なら、 ΔT 、 $\overline{\Delta T}$ は負であるため、その大きさの大小関係としては $|\Delta T| > |\overline{\Delta T}|$ であることに注意してほしい。上述を定性的にまとめれば、「気温の高度変化に外的要因がない場合は、断熱的に上昇する空気塊に大気から働く浮力と重力はつり合っている。しかし、外的要因によって高度上昇における気温減少が大きくなってしまうと、大気の密度増加が大きくなり、断熱的に上昇してきた空気塊が大気から受ける浮力が重力より大きくなるため、元の高さに戻らない」ということである。

ゆえに実現する温度の減少率（気温減率）は(g)までで考えた乾燥気温減率よりも小さくないといけなことがわかる。

- (i) (g)までで考えた乾燥気温減率には、水蒸気が凝縮して水滴になる効果が考慮されていない。実際の大気では水蒸気の凝縮の効果を考慮した湿潤気温減率(湿潤断熱減率)が現実の地表付近の大気温の高度依存性をよく説明することが知られている。地表付近の湿潤気温減率の値は約 $6.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$ であり、乾燥気温減率（約 $1.0 \times 10^{-2} \text{ K/m}$ ）より小さい。