

(令和元年 8 月 22 日実施)

令和 2 年度

北海道大学大学院理学院 物性物理学専攻・宇宙理学専攻 修士（博士前期）課程入学試験 専門科目問題（午後）

受験に関する注意

- 試験時間： 13:00～15:30 の 2 時間 30 分
- 解答紙、草案紙ともに受験番号を記入する。氏名は記入しない。
- 解答の際、途中の問が解けないときも問題文に記されている結果等を使ってそれ以降の問を解いてよい。
- 試験終了後、解答紙、草案紙ともすべて提出する。
- 物性物理学専攻志望者（宇宙理学専攻を併願する者を含む）：問題 III, IV を解答すること。
- 宇宙理学専攻志望者：
 - － 宇宙物理学・素粒子論・原子核理論・情報メディア科学・原子核反応データ科学を志望するものは問題 III, IV を解答すること。
 - － 惑星宇宙グループ・宇宙物質科学・相転移ダイナミクス・飛翔体観測を志望するものは問題 III, IV, V, VI, VII の中から 2 つの問題を選択して解答すること。
- 配布するものは

専門科目問題冊子	問題 III	3 枚 (A4)
	問題 IV	2 枚 (A4)
	問題 V	1 枚 (A4)
	問題 VI	3 枚 (A4)
	問題 VII	2 枚 (A4)
解答紙	2 問題分	5 枚 (B4)
草案紙	2 問題分	2 枚 (B4) (各問題 1 枚)

問題 III

問 1 質量 m の粒子が 1 次元デルタ関数ポテンシャル $(-V_0\delta(x), V_0 > 0)$ 中にある。粒子のエネルギーが $E (< 0)$ のとき、粒子の波動関数を $\varphi(x)$ としてシュレディンガー方程式は以下の式で与えられる。粒子の束縛状態について以下の問に答えよ。ただし、 \hbar はプランク定数を 2π で割ったものである。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} - V_0\delta(x)\varphi(x) = E\varphi(x) \quad (E < 0)$$

- 1-1. $x \neq 0$ の領域で波動関数が $\varphi(x) = Ce^{-\kappa|x|}$ で表されることを示し、 κ を E 、 m 、 \hbar を使って表せ。ただし、 $C (> 0)$ は規格化定数である。
- 1-2. $\varepsilon (> 0)$ を微小量として、 $-\varepsilon < x < \varepsilon$ の範囲でシュレディンガー方程式を積分すると、以下の式が成り立つことを示せ。また、 $\varepsilon \rightarrow 0$ の極限をとったとき成り立つ式を示せ。

$$\frac{d\varphi(\varepsilon)}{dx} - \frac{d\varphi(-\varepsilon)}{dx} - \frac{2m|E|}{\hbar^2} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \varphi(x)dx + \frac{2mV_0}{\hbar^2} \varphi(0) = 0$$

- 1-3. 束縛状態のエネルギー E 、および波動関数の規格化定数 C を V_0 、 m 、 \hbar を使って表せ。
- 1-4. $\varphi(x)$ 、 $\frac{d\varphi(x)}{dx}$ をグラフで表示し、それぞれ奇関数か、あるいは偶関数か述べてよ。
- 1-5. $\varphi(x)$ と $\frac{d\varphi(x)}{dx}$ の対称性から位置座標 x と運動量 p の期待値 $\langle \varphi | x | \varphi \rangle$ 、 $\langle \varphi | p | \varphi \rangle$ をそれぞれ求めよ。
- 1-6. 以下の式で定義される位置座標の分散を計算せよ。

$$\langle \varphi | (\Delta x)^2 | \varphi \rangle = \langle \varphi | x^2 | \varphi \rangle - \langle \varphi | x | \varphi \rangle^2$$

- 1-7. 以下の式で定義される運動量の分散を計算せよ。

$$\langle \varphi | (\Delta p)^2 | \varphi \rangle = \langle \varphi | p^2 | \varphi \rangle - \langle \varphi | p | \varphi \rangle^2$$

- 1-8. 位置と運動量の不確定積 $\langle \varphi | (\Delta x)^2 | \varphi \rangle \langle \varphi | (\Delta p)^2 | \varphi \rangle$ を計算せよ。

問 2 水素原子の $2p$ 軌道に電子が入るときを仮想的に考え、その軌道の電子による磁性を調べる。水素原子の波動関数は主量子数 n 、方位量子数 l 、磁気量子数 m で指定され、極座標表示で以下の式で表すことができる。

$$\varphi_{nlm} = R_{nl}(r)Y_l^m(\theta, \phi) = R_{nl}(r)C_{lm}P_l^{|m|}(\cos\theta)e^{im\phi}$$

ここで、 $R_{nl}(r)$ と $Y_l^m(\theta, \phi)$ は動径波動関数と球面調和関数であり、 C_{lm} は規格化定数、 $P_l^{|m|}(\cos\theta)$ はルジャンドル陪関数である。また i は虚数単位である。一方、電子の存在確率の流れ \vec{j} は波動関数 φ を使って、 $\vec{j} = \frac{\hbar}{2im_e}(\varphi^*\vec{\nabla}\varphi - \varphi\vec{\nabla}\varphi^*)$ で定義される。ここで、 \hbar はプランク定数を 2π で割ったもの、 m_e は電子の質量である。また極座標表示での微分演算子は以下の式となる。

$$\vec{\nabla} = \vec{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \vec{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \vec{e}_\phi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

ここで \vec{e}_r 、 \vec{e}_θ 、 \vec{e}_ϕ はそれぞれ r (動径)、 θ (極角)、 ϕ (方位角) 方向の単位ベクトルである。以下の問に答えよ。

- 2-1. $R_{nl}(r)$ が実関数であることを使って、確率の流れの r 成分 j_r を計算せよ。
- 2-2. $P_l^{|m|}(\cos\theta)$ が実関数であることを使って、確率の流れの θ 成分 j_θ を計算せよ。
- 2-3. 確率の流れの ϕ 成分 j_ϕ を計算し、 j_ϕ が磁気量子数 m に比例し、また ϕ に依存しないことを示せ。

次に前問より磁気量子数 m がゼロでないとき、 $j_\phi \neq 0$ となるので、 z 軸周りに電荷の流れが存在する。この場合、 $m \neq 0$ よりこの軌道は z 軸方向の磁気モーメントの成分 μ_z を持つことになる。この μ_z を z 軸周りの電流から以下の問にしたがって計算する。ただし、電子のスピンによる磁性は無視する。

- 2-4. 図1で示した動径 r 、極角 θ の位置での微小断面積 $rdrd\theta$ を z 軸周りに回転してできた灰色の領域の円電流を考える。この円電流によって z 軸方向に誘起される微小磁気モーメントの成分 $d\mu_z$ は (円電流) \times (円の面積) で求めることができる。 $d\mu_z$ を j_ϕ と電子の電荷 $q_e (< 0)$ を用いて表せ。

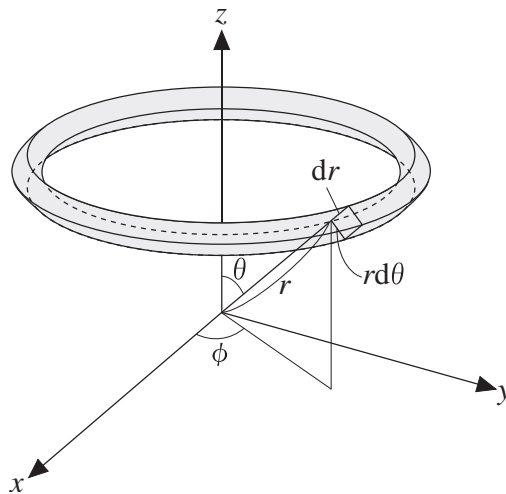


図1

- 2-5. 波動関数が以下の式で表される φ_{211} ($m = 1$ の $2p$ 軌道) の場合、前問で求めた z 軸方向に誘起する微小磁気モーメント $d\mu_z$ を r と θ で積分して、 $\mu_z = -\frac{\hbar|q_e|}{2m_e} = -\mu_B$ となることを示せ。ただし、 μ_B はボーア磁子である。

$$\varphi_{211} = R_{21}(r)Y_1^1(\theta, \phi) = -\frac{1}{2\sqrt{6}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{2a_0}} \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin\theta e^{i\phi}$$

ここで、 a_0 はボーア半径である。また計算では以下の定積分を使って良い。

$$\int_0^\pi \sin^3\theta d\theta = \frac{4}{3}, \quad \int_0^\infty x^4 e^{-x} dx = 24$$

- 2-6. 波動関数が φ_{21-1} ($m = -1$ の $2p$ 軌道) の場合、前問と同様に j_ϕ が m に比例することを使って z 軸方向に誘起する磁気モーメントの成分 μ_z を μ_B を単位として求めよ。

問題 IV

問 1 図 1 のような気体の入った容器 A と容器 B がある。それぞれの容器にはおもりをつけることにより容器内の圧力を p_A 、 p_B ($p_A > p_B$) に保つ。この容器の間をガラスウールの詰まった管でつなぎ容器 A の気体を容器 B にゆっくりと噴出させる。ここで気体定数を R とする。

1-1. 容器 A の気体の 1mol (体積 V_A) が管を通して容器 B に噴出した。その時の体積を V_B とする。この過程で移動した気体のエンタルピー H が変化しないことを示せ。

この過程で容器 A での気体の温度 T_A と容器 B に噴き出すときの温度 T_B との差 $T_A - T_B$ と圧力差 $p_A - p_B$ の関係は、ジュール・トムソン係数 $\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H$ を調べればわかる。

1-2. μ_J は、定圧熱膨張率 $\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ を用いて以下のように書ける。

$$\mu_J = K(\beta T - 1)$$

このときの K を定圧モル比熱 c_p とモル体積 V_M を用いて表せ。必要ならば以下の関係式を用いてよい。ただし S はエントロピーとする。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial H}\right)_T = -1, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T$$

1-3. 理想気体の場合、容器 B に噴出するとき、気体の温度がどのようになるか答えよ。

1-4. 以下の状態方程式に従うファンデルワールス気体において $\mu_J = 0$ となる温度を求めよ。

$$p = \frac{RT}{V_M - b} - \frac{a}{V_M^2} \quad (a > 0, b > 0)$$

1-5. 容器 A での気体の温度 T_A が上記の温度より高温だった場合と、低温だった場合、それぞれについて噴出する気体の温度がどのように変化するか述べよ。

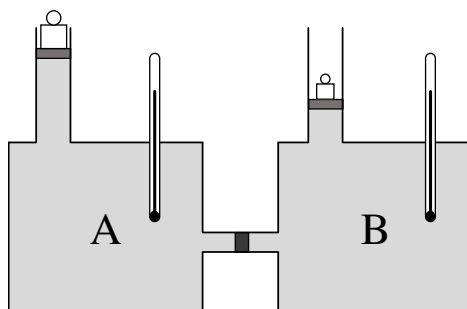


図 1

問 2 エネルギー準位が $+\varepsilon$ 、 $-\varepsilon$ の 2 準位系を考える。粒子数を N 、全体のエネルギーを E とする。

2-1. $+\varepsilon$ 、 $-\varepsilon$ の準位の粒子数 N_+ (> 0)、 N_- (> 0) を ε 、 N そして E を用いて表せ。

2-2. 近似式 $\ln N! \approx N \ln N - N$ を用いてエントロピーを計算せよ。ここでボルツマン定数を k_B とする。

2-3. 平衡状態で系のエネルギー E が温度 T を用いて下の式となることを導け。

$$E = \varepsilon N \frac{\exp\left(-\frac{2\varepsilon}{k_B T}\right) - 1}{\exp\left(-\frac{2\varepsilon}{k_B T}\right) + 1}$$

2-4. この 2 準位系の定積熱容量 C_V を求めよ。

問 3 エントロピーの概念は、科学の広い分野に応用されている。その 1 つに情報エントロピーがある。ありふれた事象の情報量は少なく、めったにない事象の情報量は多いと考えられる。ある事象 x を観測する確率分布を $p(x)$ とした時、情報量 $h(x)$ は以下の性質をもつ。

- $p(x)$ に対して正の単調減少関数
- 無関係な 2 つの事象 x 、 y を観測したときの情報量はそれぞれの情報量の和 $h(x, y) = h(x) + h(y)$ となる

3-1. $h(x) = -\ln p(x)$ が上記の条件を満たしていることを示せ。

次に、サイコロの目のように事象 x_i が離散的である場合の情報エントロピー H を情報量の期待値として以下のように定義する。このエントロピーはシャノンのエントロピーと呼ばれ統計力学でのギブスエントロピーと定数倍を除いて一致する。

$$H = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i)$$

最も確からしい確率分布は、情報エントロピーを最大にするものとして決定される。

3-2. 確率変数が $x_i (i = 1, \dots, N)$ の離散系での最も確からしい確率分布 $p(x_i)$ を求めよ。

3-3. 次に確率変数が連続の場合を考える。情報エントロピーを連続の場合に拡張し、一次モーメントと二次モーメントが以下で与えられるとき、最も確からしい確率分布 $p(x)$ を求めよ。ここで B は正の定数とする。

$$\int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x)dx = B^2$$

必要ならば α を正の定数とした場合の以下の公式を用いてよい。

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-\alpha x^2} dx = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$

問題 V

以下の全ての問に答えよ。解答にあたっては結果だけでなく、導出過程も記すこと。

問 1 以下の問に答えよ。

1-1. 三次元空間内を運動する点 P の位置ベクトルを $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ とする。ここで t は時間、 x, y, z は直交座標を表す。点 P の運動が以下の (1) または (2) の関係式を満たす場合、それぞれの運動はどのような軌跡を描くか説明せよ。適宜図を用いても良い。

$$(1) \mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} = 0$$

$$(2) \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \text{ ただし } \boldsymbol{\omega} = (0, 0, 1)$$

1-2. 三次元空間におけるベクトル場 $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ が渦無しである場合、 $\mathbf{a} \times \mathbf{r}$ は湧きだし無しとなることを証明せよ。ただし $\mathbf{r} = (x, y, z)$ を動径ベクトルとする。

問 2 z を複素数とする。以下の問に答えよ。

2-1. $z^3 = 1$ の解をすべて求めよ。

2-2. z の関数 $f(z) = \frac{1}{z^3 - 1}$ の極 $z = 1$ における留数を求めよ。

2-3. 前問の $f(z)$ を複素平面の $z = 1$ を中心とする半径 1 の円周に沿って反時計回りに一周積分した時の値を求めよ。

問 3 複素数を成分とする $n \times n$ の正方行列 \mathbf{A} の各成分を a_{ij} とする。 $a_{ij} = \overline{a_{ji}}$ を満たす場合、行列 \mathbf{A} はエルミート行列と呼ばれる。ここで記号 $\overline{}$ は複素共役を表す。以下の問に答えよ。

3-1. 次の行列 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} のうち、エルミート行列であるものをすべて挙げよ。ここで i は虚数単位である。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 2 & 1+i \\ 1-i & 5 \end{pmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & -1+i \\ 1-i & -1 \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

3-2. エルミート行列 $\begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}$ の固有値と固有ベクトルを求めよ。

3-3. 一般に、エルミート行列の固有値は実数であることを証明せよ。

3-4. 一般に、エルミート行列の異なる固有値に属する固有ベクトルは、互いに直交することを証明せよ。

問 4 実数 t および x の関数 $f(t, x)$ が次の偏微分方程式に従っている。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$$

関数 f が、 $x = 0$ において $f(t, 0) = \operatorname{Re}(e^{it})$ 、また $\lim_{x \rightarrow \infty} f(t, x) = 0$ に従うとき、解を変数分離の手法を用いて求めよ。

問題 VI

地球の表面は、太陽放射と大気による温室効果によって生命の存在に適した温度に保たれている。近年は、地球の表面温度が世界的に上昇する地球温暖化が進行している。地球温暖化をもたらす原因の 1 つとして化石燃料の使用が考えられている。以下の問に答えよ。

問 1 図 1(a) に示した近年の表面温度の長期的な上昇現象が地球温暖化である。これに対して、図 1(b) は過去 14 万年における表面温度の変化を示したものであり、氷期・間氷期サイクルが現れている。図 1 を用いて以下の量を求めよ。図からどのように数値を読み取ったかの説明も行うこと。

- (1) 過去 100 年間の地球温暖化による表面温度の平均時間変化率 [K/年]
- (2) 氷期の温度最低期から間氷期の温度最高期に移行する期間の、表面温度の平均時間変化率 [K/年]

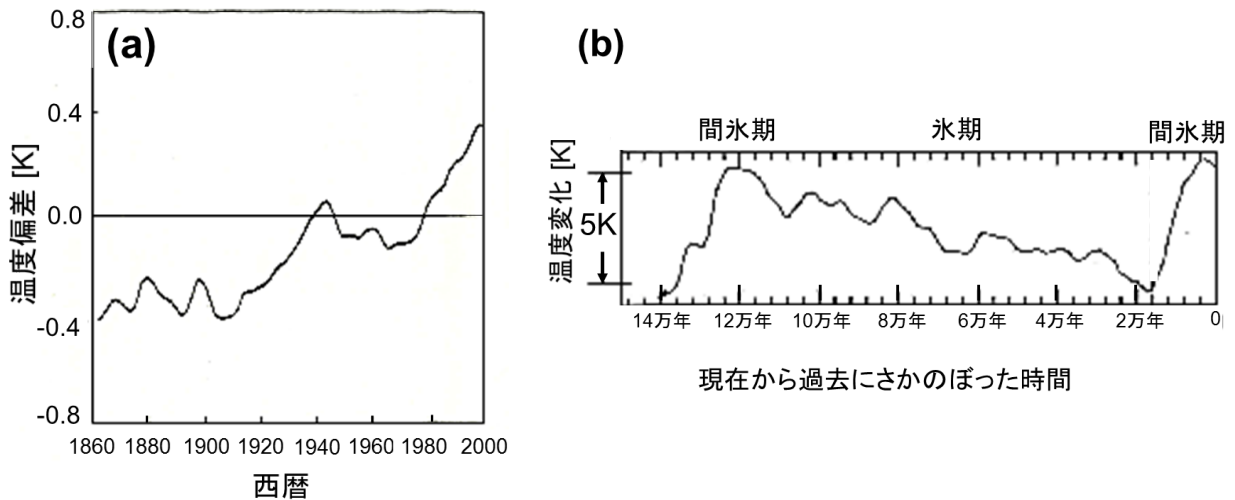


図 1 表面温度の全球平均値の時間変化。(a) 地球温暖化の場合。縦軸は 1961 年から 1990 年までの期間の平均値からの温度偏差。(b) 氷期・間氷期サイクルの場合。

問 2 問 1 で求めた 2 つの表面温度の時間変化率の値をもとに、地球温暖化が社会的に問題視されている理由を説明せよ。

問 3 地球の表面温度の決定に重要な役割を果たしている太陽放射のエネルギーは、太陽の内部においてどのようにして作り出されているのかを説明せよ。

問 4 春分における太陽放射の地球への入射について考える (図 2)。太陽定数 (単位断面積・単位時間あたりに入射する太陽放射エネルギー量) を S [W/m^2]、地球半径を R [m] とする。このとき、大気上端において各緯度が単位時間・単位面積あたりに受け取る太陽放射エネルギー量の東西平均値を緯度 θ の関数として求めよ。また、そのグラフの概形も描け。

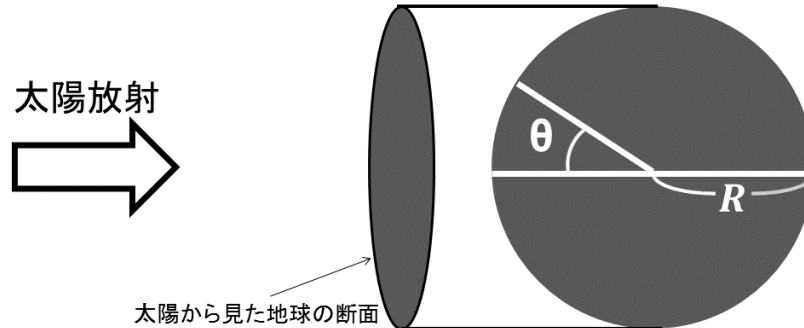


図 2 春分における太陽放射の地球への入射の模式図。

問 5 地球が受け取る太陽放射エネルギー量を地球表面全体で水平平均すると $\frac{S}{4}$ となることを示せ。
問 4 の結果を用いても良い。

温室効果の強さを見積もるため、次ページの図 3 に示す単純化した状況を考える。大気は 1 層であると仮定し、地球表面全体を水平方向に平均した状況を考える。大気上端に水平平均太陽放射エネルギー量 $\frac{S}{4}$ が入射し、表面温度が T_g [K]、1 層大気の温度が T_a [K] となっているものとする。太陽放射は大気に吸収されず表面まで到達し、表面において A の割合で反射されるものとする。表面は σT_g^4 の赤外放射を射出し、1 層大気は σT_a^4 の赤外放射を宇宙空間と表面に向けて射出する。表面から射出された赤外放射のうち割合 k ($0 \leq k \leq 1$) が大気に吸収されるとする。 $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ はステファン・ボルツマン定数である。

問 6 大気の熱バランスを表す式、および表面の熱バランスを表す式をそれぞれ書け。

問 7 大気が無い場合の表面温度 T_g を S 、 σ 、 A を用いて表せ。

問 8 $S = 1400 \text{ W m}^{-2}$ 、 $A = 0.3$ の場合に、大気が無い場合の表面温度の値を有効数字 2 桁で求めよ。4 乗根の計算の際には次ページの表 1 を用いよ。

問 9 問 6 で得た式を用いて、 $k \neq 0$ の場合の T_g を S 、 σ 、 A 、 k を用いて表せ。

問 10 $S = 1400 \text{ W m}^{-2}$ 、 $A = 0.3$ 、 $k = 0.9$ の場合では、大気が無い場合と比較して、 T_g は何度上昇するか、有効数字 2 桁で答えよ。4 乗根の計算の際には表 1 を用いよ。

問 11 化石燃料の使用により表面温度が上昇する理由を説明せよ。

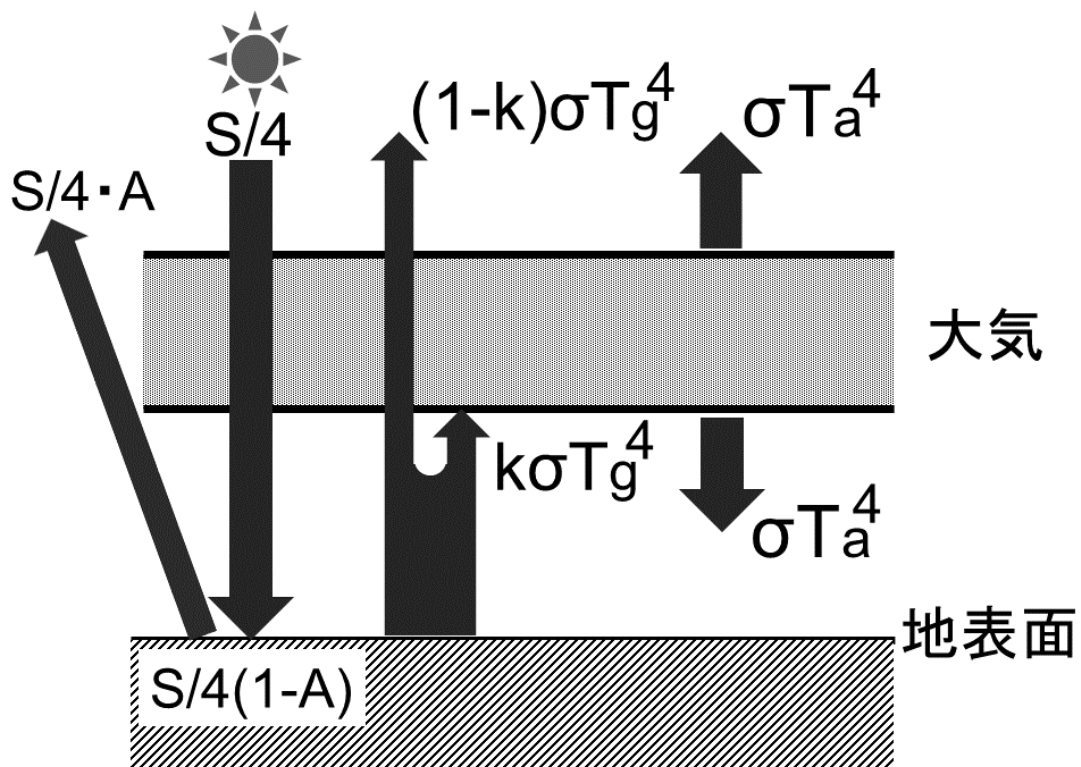


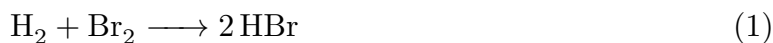
図3 温室効果を表現する大気1層モデル。

表1 4乗根の数値表

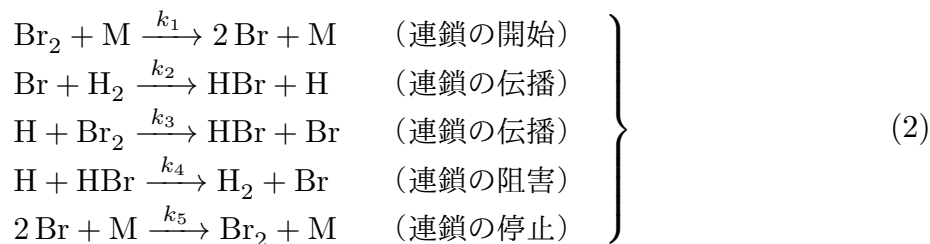
n	$n^{1/4}$	n	$n^{1/4}$	n	$n^{1/4}$	n	$n^{1/4}$	n	$n^{1/4}$
2	1.2	13	1.9	31	2.4	53	2.7	73	2.9
3	1.3	17	2.0	37	2.5	59	2.8	79	3.0
5	1.5	19	2.1	41	2.5	61	2.8	83	3.0
7	1.6	23	2.2	43	2.6	67	2.9	89	3.1
11	1.8	29	2.3	47	2.6	71	2.9	97	3.1

問題 VII

問 1 以下の水素と臭素の気相反応について考える。



式 (1) の反応は、次の一連の素過程よりなる。



ここで、 $k_1 \sim k_5$ は各素反応の速度定数を、そして M は系内の他の気体分子を示す。 H_2 、 Br_2 、 HBr 、 H 、 Br 、 M の濃度をそれぞれ $[\text{H}_2]$ 、 $[\text{Br}_2]$ 、 $[\text{HBr}]$ 、 $[\text{H}]$ 、 $[\text{Br}]$ 、 $[\text{M}]$ とすると、 HBr の正味の生成速度 $\frac{d[\text{HBr}]}{dt}$ は式 (3) で表される。

$$\frac{d[\text{HBr}]}{dt} = \frac{k[\text{H}_2] \cdot [\text{Br}_2]^{1/2}}{1 + k'[\text{HBr}]/[\text{Br}_2]} \quad (3)$$

ここで、 k および k' は見た目の速度定数を、そして t は時間を示す。以下の問に、速度定数 $k_1 \sim k_5$ 、 $[\text{H}_2]$ 、 $[\text{Br}_2]$ 、 $[\text{HBr}]$ 、 $[\text{H}]$ 、 $[\text{Br}]$ 、 $[\text{M}]$ のうち必要なものを用いて答えよ。

1-1. 素反応群式 (2) より、生成物 HBr の正味の生成速度 $\frac{d[\text{HBr}]}{dt}$ を示せ。

1-2. また、 H および Br の正味の生成速度 $\frac{d[\text{H}]}{dt}$ および $\frac{d[\text{Br}]}{dt}$ を示せ。

1-3. H および Br は活性が高い化学種であるため、系内には常にごく少量しか存在しない。そのため、 H および Br については定常状態が仮定できる。これより、 $[\text{H}]$ および $[\text{Br}]$ を表せ。

1-4. 前問で得た $[\text{H}]$ および $[\text{Br}]$ を用いて、 $\frac{d[\text{HBr}]}{dt}$ の $[\text{H}_2]$ 、 $[\text{Br}_2]$ 、 $[\text{HBr}]$ に対する依存性を示せ。また、式 (3) 中の見た目の速度定数 k および k' を、速度定数 $k_1 \sim k_5$ を用いて表せ。

問 2 平らなガラス板上に過飽和な水蒸気中から微小な水滴が生じる場合について考える。簡単のため、ガラス板上の微小な水滴は、図に示したように半球状の形状をしている（水滴とガラス板の濡れ角は 90° とし、重力による水滴の変形は考えない）。過飽和水蒸気中および水滴中での水 1 分子の自由エネルギー（化学ポテンシャル）をそれぞれ μ_V 、 μ_L とすると、水 1 分子が過飽和水蒸気から水滴中に取り込まれた際の自由エネルギー変化は $\Delta\mu = \mu_L - \mu_V$ と表される。過飽和水蒸気よりも液体の水の方が安定な相であるため、 $\Delta\mu < 0$ となる。また、水滴の自由表面および水滴とガラス板の接触面では、水分子同士の結合が切断された状態にあるため、水滴内部に比べて単位面積あたりそれぞれ γ_{VL} および γ_{LG} だけ自由エネルギーが高く不安定である。水滴は N 個の水分子から構成されており、水滴の自由表面および水滴とガラス板の接触面の面積をそれぞれ S_{VL} および S_{LG} とする。過飽和水蒸気からガラス板上に水滴ができる際の自由エネルギー変化 ΔG は式 (4) で表される。

$$\Delta G = N \cdot \Delta\mu + S_{VL} \cdot \gamma_{VL} + S_{LG} \cdot \gamma_{LG} \quad (4)$$

以下の問に答えよ。

2-1. 半球状の水滴の半径を r とし、水滴中の水 1 分子が占める体積を v とすると、式 (4) は式 (5) と表せることを導け。ただし、 $\gamma_{total} = 2\gamma_{VL} + \gamma_{LG}$ とする。

$$\Delta G = \frac{2\pi\Delta\mu}{3v} \cdot r^3 + \pi\gamma_{total}r^2 \quad (5)$$

2-2. 縦軸を ΔG 、横軸を r として、 ΔG と r の関係を図示せよ。その際、 $\Delta\mu < 0$ であることに注意せよ。

2-3. 自由エネルギー変化 ΔG が最大となる時の半径 r_{crit} を求めよ。

2-4. 水滴とガラス板の接触面の自由エネルギー γ_{LG} が大きくなると、水滴は生成しやすくなるか、もしくは逆に生成しにくくなるか、理由を挙げて説明せよ。ただし γ_{LG} の値によらず水滴の形状は変わらないものとする。

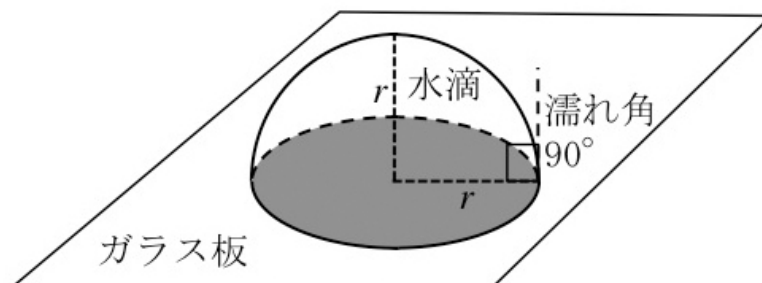


図 1