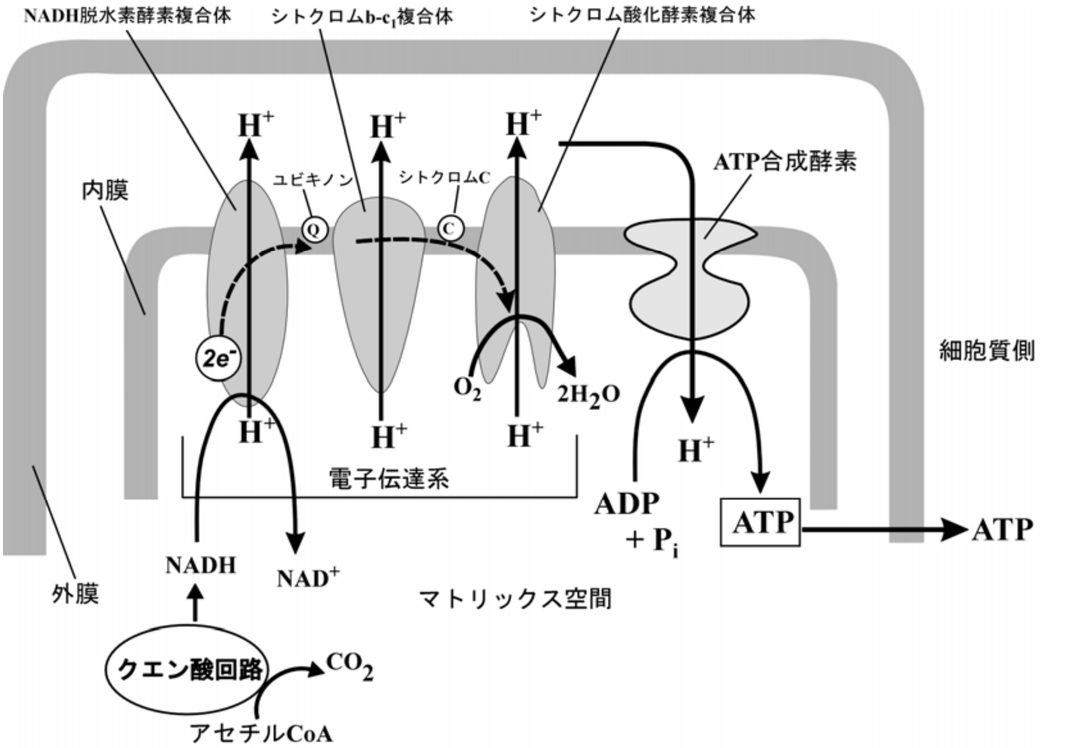
生物工学　Ⅱ

次の[Ⅱ - 1]～[Ⅱ - 3]の３題を，それぞれ別の解答用紙に答えよ．

[Ⅱ - 1]（生物）

（問１）　ミトコンドリアにおける ATP 合成機構の概略を図に示した．



ア～ソの空欄を埋めて，この図の説明文を完成させよ．（解答用紙には，ア～ソに対応させて語句を記せ．）

ミトコンドリアは，ほとんどの［ア］細胞に存在する．ATP の大部分がこの細胞器官で生産される．ミトコンドリアは［イ］によってアセチル基を代謝し，高エネルギー電子の運搬体である活性化［ウ］と廃棄物である［エ］をつくり出す．

［ウ］分子は，自分のもつ高エネルギー電子をミトコンドリアの内膜にある電子伝達系に渡して酸化され，［オ］となる．電子伝達系に沿った電子の運搬はエネルギー的に起こりやすい現象で，移動の開始時には極めて高いエネルギー状態にあった電子は，伝達体を経て移動していく段階ごとにエネルギーを失いながら，最後に［カ］に渡される．電子はここで［キ］を活性化し，［ク］を生成する．この系は［ケ］ともよばれる．細胞呼吸で酸素を必要とするのはこの段階で，我々が呼吸している酸素が使われる．この電子伝達系に沿って電子が移動する間に放出されたエネルギーがプロトン H^+ を汲み出すのに使われる．その結果，ミトコンドリア内膜を挟んで H^+ の［コ］が生じる．マトリックス内の pH は膜間部分より 1pH 単位程高くなり，膜間部分に比べるとマトリック

（次のページに続く）

ス空間の H^+ 濃度は［　サ　］程度になる．また，［　シ　］電荷をもつ H^+ が流出した結果，電位はマトリックス側が［　ス　］で，外側（膜間部分）が［　シ　］となり，ミトコンドリア内膜を挟んで電位差が発生する．これらの電気化学的ポテンシャル勾配によって ATP 合成反応機構が駆動される．この仕事は膜貫通タンパク複合体である［　セ　］によってなされる．プロトンが流れる際のエネルギーを使ってマトリックス側で ADP と P_i から ATP を合成する過程を［　ソ　］とよんでいる．

（問２）以下に述べる１）～３）のプロセスを経て 2 個の電子が NADH から酸素分子まで運搬されて ATP が合成されると，1 個の NADH 分子あたり何分子の ATP が合成されるか．理由を付して述べよ．

１）電子 1 個が３種類の呼吸酵素複合体を通過して流れるたびにミトコンドリア内膜を通過して 5 個のプロトンが汲み出される．

２）ミトコンドリア内部で ATP 合成酵素が無機リン酸と ADP から ATP 分子を合成するとき，３個のプロトンが ATP 合成酵素を通過する．

３）合成された ATP 分子をミトコンドリアから細胞質へと輸送するのに必要な電位勾配をつくるのに 1 個のプロトンが使われる．

（問３）ミトコンドリアの内膜を挟んで，マトリックス側は膜間部分に比べて電位 ϕ が 140 mV 低く，pH は 1 高い．３個のプロトンが ATP 合成酵素を通って膜間部分からマトリックス側へ移動することで 1 分子の ATP が合成される場合を考える．膜間部分およびマトリックス側の電気化学的ポテンシャルをそれぞれ μ_o，μ_i と記す． 1 mol の ATP を合成するのに必要な自由エネルギー変化は何 kcal/mol になるか計算せよ．ただし，細胞の温度 T は 27 ℃とする．また，プロトン H^+ 1 個当たりの自由エネルギー（電気化学的ポテンシャル）は $\mu = k_B T \cdot \ln C + Ze\phi + f(p,T)$ で与えられる．ここで，C は H^+ の濃度，Ze は電荷，ϕ は電位，k_B はボルツマン定数である．また $f(p,T)$ は圧力 p，温度 T のみの関数である．必要なら $1\ \mathrm{eV} = 3.83\mathrm{x}10^{-20}$ cal，ボルツマン定数 $k_B = 1.38\mathrm{x}10^{-23}$ J/K，$1\ \mathrm{J} = 0.239$ cal，アボガドロ数 $N_A = 6.02\mathrm{x}10^{23}$/mol，ln10=2.30 を用いよ．

［Ⅱ－２］（物理）

スピン関数 α，β をベクトル表現にならって $\alpha=\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$, $\beta=\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ と書く．

スピン関数 α，β は，z 軸をスピン量子化軸に選んだときの固有関数で，$\boldsymbol{S}_z$ と $\boldsymbol{S}^2$ を同時に対角化するような基底関数である．
スピン角運動量演算子 $\boldsymbol{S}$ の z 成分は α，β を基底関数とする行列表現では

$\boldsymbol{S}_z=\dfrac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}$ で表わされる．また，$\boldsymbol{S}_x=\dfrac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}$ および $\boldsymbol{S}_y=\dfrac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0&-\boldsymbol{i}\\\boldsymbol{i}&0\end{pmatrix}$ と書ける．

（問１）スピン関数 α，β を使って $\boldsymbol{S}_z$ の固有値が $\dfrac{\hbar}{2}$ および $-\dfrac{\hbar}{2}$ であることを示せ．

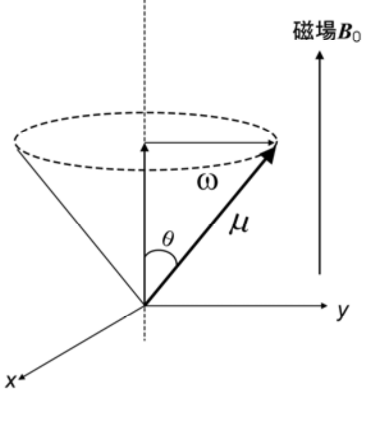
（問２）$\boldsymbol{S}_\pm=\boldsymbol{S}_x\pm i\boldsymbol{S}_y$ とするとき，$\boldsymbol{S}_+\alpha$，$\boldsymbol{S}_-\alpha$，$\boldsymbol{S}_+\beta$，$\boldsymbol{S}_-\beta$ を求めよ．

（問３）$\boldsymbol{S}_x{}^2$，$\boldsymbol{S}_y{}^2$，$\boldsymbol{S}_z{}^2$ および $\boldsymbol{S}^2$ の行列表現を求めよ．
これより $\boldsymbol{S}^2$ の固有値を求めよ．

（問４）スピンの角運動量 $\boldsymbol{S}$ は磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ の小磁石とみなされ $\boldsymbol{\mu}=\gamma\boldsymbol{S}$ の関係にある．γ を磁気回転比という．磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ が磁場 $\boldsymbol{B}_0$ 中におかれると，磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ は下図に示すように，磁場 $\boldsymbol{B}_0$（z 方向にとる）に対して角度 θ だけ傾いたまま，一定の角速度 ω で歳差運動を行う．角運動量の時間変化は，これを変えようとするねじりの力（トルク $\boldsymbol{\mu}\times\boldsymbol{B}_0$）に等しいという力学の原理に従って運動方程式を立て，この歳差運動の角速度 ω を求めよ．

（問５）スピン量子数 $S=1/2$ の電子スピンの磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ が磁場 $\boldsymbol{B}_0$（z 軸）となす角度を求めたい．問１～３の結果を使って $\cos\theta$ を求めよ．また，角度 θ は幾通りあるか示せ．

（問６）磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ が磁場 $\boldsymbol{B}_0$（z 軸方向）の周りを角速度 ω で歳差運動している系に，同じ角速度 ω で $\boldsymbol{x}$-$\boldsymbol{y}$ 面内を回転する振動磁場 $\boldsymbol{B}_1$ が加えられたときの磁気モーメント $\boldsymbol{\mu}$ の z 成分（μ_z）の運動について述べよ．ただし，振動磁場 $\boldsymbol{B}_1$ を（$B_1\cos(\omega t)$, $-B_1\sin(\omega t)$, 0）とする．



[II - 3]（情報・システム）

（問１）　下の文章の（　）の中に適当な語句を入れ，[　] の中に {} 内に列挙された選択肢から適当な語句を選んで入れよ．また，表１の [　] 中の { } 内に列挙された選択肢から適当な数字を選ぶことで表１を完成させ，解答用紙に記せ．

MOSFET(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)は現在の集積回路などで最も一般的に使用されているトランジスタであり，（　a　），（　b　），ゲート の三つの電極を持つ．MOSFET にはその構造によって P 型 MOSFET (PMOS)と N 型 MOSFET(NMOS)の二種類があり，その働きが異なっている．図 1 に NMOS を用いた最も基本的な回路を示す．図 1 では，MOS　αの（　a　）が Vcc(電源)に，（　b　）が GND(接地)に，ゲートが端子 A に接続されている．ここで，端子 A と Vcc の電位を同じにすると，（　a　）—（　b　）間が短絡され，Vcc — GND 間に電流が流れる．逆に端子 A と GND の電位を同じにすると，（　a　）—（　b　）間が絶縁され，Vcc — GND 間に電流が流れない状態になる．すなわち，NMOS はゲートに Vcc の電位と同じ電位が加わったとき，[　c {ON・OFF}　] になるスイッチとして機能する．PMOS は NMOS のちょうど逆の働きをする．回路図上での MOSFET の記述方法は様々だが，図 1 の形式の記述では，PMOS と NMOS は矢印の方向で見分けることができる．

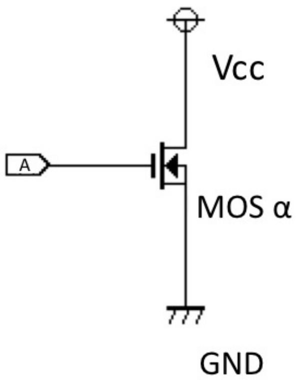


図１

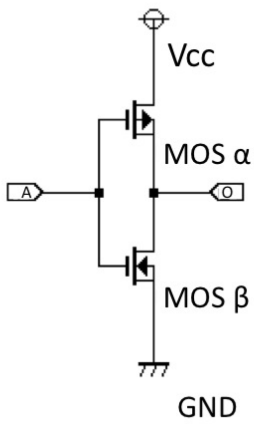


図２

表１

A	O
0	[{0, 1}]
1	[{0, 1}]

図 2 は，PMOS と NMOS を組み合わせて作った論理回路である．この論理回路で，端子 A と Vcc の電位を同じにすると MOS　αの（　a　）—（　b　）間が [　d {短絡・絶縁}　] され，MOS　βの（　a　）—（　b　）間が [　e {短絡・絶縁}　] されるため，端子 O の電位は [　f {Vcc・GND}　] の電位と同じになる．このように性質の異なる二つの MOSFET を組み合わせて構成した回路を（　g　）回路と呼ぶ．図 2 において端子 A の電位が Vcc か GND のいずれかの電位と同じであれば，Vcc—GND 間は安定状態で [　h {短絡・絶縁}　] され，（　i　）が極めて小さくなる．このように，（　g　）回路には（　i　）が極めて小さいという利点がある．

論理回路の世界では電位が V cc の電位と同じである状態を 1, GND の電位と同じである状態を 0 と表現する．従って，図 2 の回路における端子 A と端子 O の関係は表 1 の様に記載することができる．このような表を真理値表と呼ぶ．表 1 のような真理値表がえられたことから，図 2 の論理回路は（　j　）素子であることがわかる．

（次のページに続く）

（問２）下記の図 3，図 4 の回路図について，端子 A，端子 B がともに 1 のとき，MOS α，MOS β はそれぞれ ON か OFF か答えよ．また，図 3，図 4 の回路図に対応する真理値表を作成し，それぞれの素子名を答えよ．

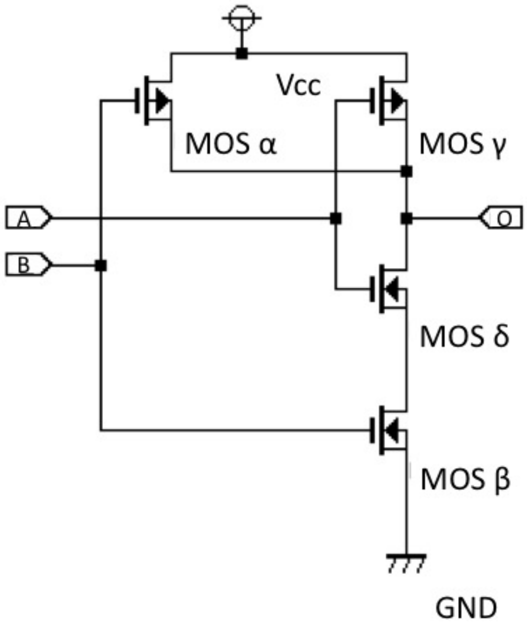


図 3

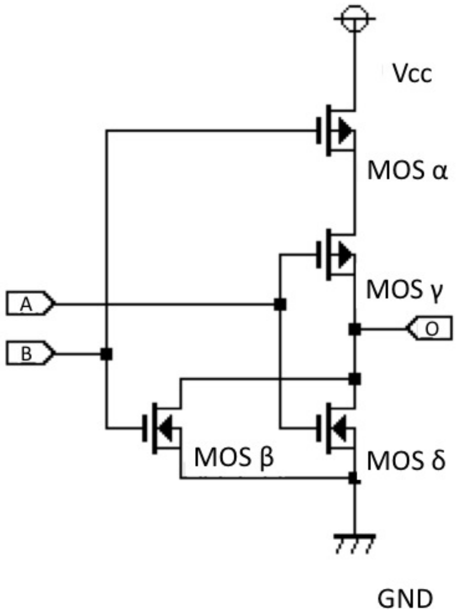


図 4

（次のページに続く）

（問３）下の文章の（　）の中に適当な語句を入れよ．また，［　］の中に {} 内に列挙された選択肢から適当な語句を選んで入れよ．

図 3 で示した素子を適切に組み合わせると，あらゆる論理回路を構成できることが広く知られている．従って，コンピュータなどの論理回路に基づく情報機器では，スイッチのオン・オフだけであらゆる情報を取り扱っている．情報機器では，あらゆるデータや数値は 1 と 0 の組み合わせ，すなわち，二進数で表現される．

二進数の桁数は（　k　）という単位で表される．また，情報量は，一般的に，欧文文字何文字に相当するかを示す（　l　）という単位で表されることが多い．何桁の二進数をまとめて情報の一単位とする（二進数何桁で欧文文字一文字を表現する）かについては文脈（機器）によって異なり，N 桁の二進数をまとめて情報の一単位とする場合には N(　k　)-(　l　) と表現されるが，一般的には（　m　）桁をまとめて取り扱うことが多い．従って，特に注釈無く 1（　l　）と記載されていれば，（　m　）(　k　)-(　l　)のことを指していると考えて差し支えない．情報量が大きくなった場合，これらをまとめて K(キロ)，M(メガ)，（　n　），（　o　）等を用いて表現する．我々が通常用いる十進数の世界では K は 1000 倍を表現するが，情報機器においては数値が二進数で表現されることから K は（　p　）倍を表現する．同様に，M は K の（　p　）倍，(　n　) は M の（　p　）倍，（　o　）は（　n　）の（　p　）倍を表す．

情報機器の中ではデータは二進数で表されているが，これをそのまま二進数で表現すると 0 と 1 の羅列になるため非常に読みにくいことから，コンピュータの解説書などではデータを一般的に 16 進数で表現することが多い．1（　l　）のデータを二進数で表現すると（　m　）桁の 0 と 1 の羅列になるが，16 進数で表現すると（　q　）桁で表現することができる．例えば，（　m　）桁 1 ばかりが並んだデータは，16 進数では（　r　）と表現できる．

情報機器の中で正負の値を表現するには，データの一番上の桁を用いて，0 の時は正，1 の時は負というように符号を表現する方法も考えられるが，一般的には二の補数表現と呼ばれる表現方法が用いられる．ある数 A の(基数の)補数 B とは，A+B が［ s {一桁上がる・ゼロになる・一桁下がる}］ような最小の数のことである．たとえば，十進数の十の補数(十進数の基数の補数)を考えると，8 の補数は 2, 4 の補数は（　t　）になる．同様に二進数の二の補数(二進数の基数の補数)では，1111 の補数は 0001，1010 の補数は（　u　）となる．二の補数表現とは，元の数の負の数を二進数の二の補数を用いて表現する方法である．例えば，二進数の 0111 の二の補数は 1001 であるが，この 1001 を用いて元の 0111，すなわち十進数の 7 の負の数-7 を表現する．

なぜ，情報機器ではこのような方法を用いるかというと，二の補数表現を用いることで，加算を用いて減算を表現することができるからである．例えば，7-7 は 7+(-7)であるから，二の補数表現で記述すると 0111 + 1001 となる．計算結果は（　v　）となり，一番上の桁を無視すると，確かに値は 0 になる．ここで，ある数の二の補数表現を得たいときは，元の数を（　w　）させ，これに（　x　）を加えればよいので，簡単な回路で負の数を得ることができる．従って，情報機器上では，加算器に簡単な回路を加えるだけで，減算も実現することができる．なお，二の補数表現を用いれば，1（　l　），すなわち，（　m　）桁の二進数で表現できる整数は，(　y　)～(　z　) の範囲である．

（次のページに続く）

（問４） 図 5 は一桁の半加算器と呼ばれる加算を計算する回路である．この回路では，A+B の答えを C，桁上がりを S に出力している．この回路の AB と CS の関係を表す真理値表（表 2）を完成させよ．なお，表 3 の XOR ゲート，AND ゲートの真理値表を参照してよい．

表 2

A	B	C	S
0	0	0	0
0	1		
1	0		
1	1		

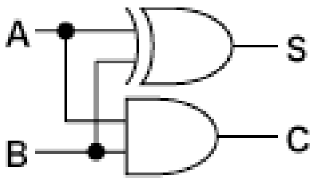
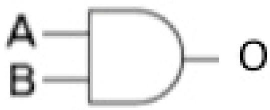


図 5

表 3

XOR ゲート			AND ゲート		
					
A	B	O	A	B	O
0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1