

筆答専門試験科目（午後）
生命理工学系

29 大修

時間 13:30~16:00

注意事項

1. 次の8題から4題を選択して解答せよ。解答する問題は4題を超えてはならない。
(5題以上は採点しない。)
2. 解答は1題ごとに別々の解答用紙に記入せよ。
3. 各解答用紙には、1枚ごとに必ず問題番号及び受験番号を記入せよ。
4. 定規、コンパス、電卓は持ち込み不可。
5. 通信機能や計算機能を持つ機器を使用してはならない。
6. 試験問題は試験終了後持ち帰って良い。

① 以下の I~IV の間に答えよ。

I. タンパク質を構成するアミノ酸のうち、酸性アミノ酸、塩基性アミノ酸をそれぞれ 2 種類ずつあげ、その名称を記し化学構造式を描け。ただし、立体化学については区別しなくて良い。

II. 多くのタンパク質は 280 nm 付近の紫外線の吸収により定量することができる。この波長付近に吸収極大を有する 3 種類のアミノ酸をあげ、その名称を記し化学構造式を描け。ただし、立体化学については区別しなくて良い。

III. 血液中のグルコース濃度（血糖値）はさまざまなペプチドやタンパク質により調節されている。血糖値の調節に関して、以下の（ア）～（セ）に入る適切な語句を答えよ。

血糖値が低下すると、膵臓の（ア）細胞から（イ）というペプチド性のホルモンが血液中に放出される。（イ）が肝細胞の表面にあるレセプターに結合すると、細胞膜に存在する（ウ）という調節タンパク質を介して（エ）という酵素を活性化する。（エ）の働きにより ATP から合成される（オ）は細胞内セカンドメッセンジャーの一つであり、（オ）依存性の（カ）を活性化する。さらに（カ）は（キ）という酵素をリン酸化して活性化し、これにより（ク）という酵素が活性化される。このようなカスケード機構により活性化された（ク）は、貯蔵されている（ケ）を分解して（コ）を産生し、さらにホスホグルコムターゼによって（サ）が産生され、これがグルコースに変換され血中に分泌される。

一方、血糖値が上昇すると、膵臓の（シ）細胞から（ス）が分泌される。（ス）がレセプターに結合すると、レセプターサブユニットの酵素が働き、自らの（セ）残基をリン酸化する。これにより、グルコース輸送系が活性化されて血中グルコースが組織に取り込まれる。

IV. 解糖系において、ピルビン酸キナーゼによりホスホエノールピルビン酸とADP からピルビン酸と ATP が生成される。以下の問に答えよ。

1) ピルビン酸キナーゼには心筋型や肝臓型等が存在する。このように異なるタンパク質でありながら同一の反応を触媒する酵素の総称を記せ。

2) さらにエネルギーを得るために、ピルビン酸はピルビン酸デヒドロゲナーゼにより (ソ)、または、ピルビン酸カルボキシラーゼにより (タ) となってクエン酸回路に入る。(ソ) と (タ) の物質名を記せ。

3) 上記問 2) の (ソ) は、解糖系以外にも、アミノ酸の代謝や脂質の β 酸化により生成される。次の問に答えよ。

i) 哺乳類で β 酸化が起きる細胞内小器官を一つ記せ。

ii) ステアリン酸 (18:0) 1 mol からは何 mol の (ソ) が生成されるか記せ。

② 以下のI～IIIの間に答えよ。

I. 次の文章を読み、以下の間に答えよ。

2015年ノーベル化学賞はDNA修復の機構解明に貢献した3人の研究者に与えられた。細胞内には複数のDNA修復機構——(a) 光回復、塩基除去修復、ヌクレオチド除去修復、ミスマッチ修復、一本鎖切断修復、二本鎖切断修復など——が存在している。DNA損傷の種類は多岐にわたるので、それらに対応するため様々な修復過程が進化してきたと考えられる。

- 1) DNA中のシトシンは脱アミノ反応によって変化しやすい。この反応で生じる塩基の名称を記せ。
- 2) 1) で生じた損傷塩基は下線部 (a) のいずれかの機構で修復され、その第1段階ではDNAグリコシラーゼという酵素が働く。このDNA修復機構の名称を記せ。
- 3) 光回復の機構では、ある酵素によってピリミジン二量体が直接解消される。この酵素の名称を次の語群の中から答えよ。

インテグラーゼ、クロロフィル、トポイソメラーゼ、フォトリアーゼ、ヘムオキシゲナーゼ

4) 二本鎖切断修復の機構は、免疫を担当するB細胞の正常な分化過程にも重要な役割を果たしている。同機構が関与するB細胞に固有の過程の名称を二つ記せ。なお、両過程ともB細胞に特異的な遺伝子の発現と関係している。

II. 以下の間に答えよ。



図1 大腸菌 *lac* オペロンの塩基配列 (一部)

1) 大腸菌 *lac* オペロンについて説明した次の文章中の (ア) ~ (ケ) 内に入る語句として最も適切なものを以下の語群の中から答えよ。同じ語句を繰り返して用いても構わない。

-10 領域は (ア) と呼ばれ、-35 領域とともに転写開始に必須な (イ) によって認識される。オペレーター配列には (ウ) が結合し、

lac オペロンの転写を (エ) しうる。(オ) のようなインデューサーの細胞内濃度が高まり、インデューサーが (ウ) に結合すると、(ウ) の DNA への結合は (カ) される。一方、(キ) は細胞内濃度が高まると CAP に結合し、CAP の DNA への結合を (ク) する。その結果、転写は (ケ) される。

GC ボックス、Pribnow ボックス、TATA ボックス、*lac* アクチベーター、*lac* リプレッサー、TBP、 α 因子、 ρ 因子、 σ 因子、リボソーム、cAMP、cGMP、CMP、ppGpp、アロラクトース、スクロース、マルトース、促進、抑制

2) 図 1 の矢頭は転写開始部位を表している。*lac* オペロンから作られる mRNA の最初の 10 塩基の配列を記せ。ただし 1 文字表記を用い、5'末端と 3'末端を明示すること。

3) *lac* オペロンに含まれる遺伝子の一つは、生命理工学研究のツールとして広く利用されており、たとえば DNA クローニングにおける青白選択に用いられている。この遺伝子の名称と遺伝子産物の名称をそれぞれ記せ。

III. 以下の問に答えよ。

1) 花子さんはタンパク質 X の機能を調べるため、RNA 干渉法を用いてマウス ES 細胞内の X の機能を抑制しようと考えた。低分子干渉 RNA (siRNA) の働きについて正しい記述を、以下の選択肢の中からすべて答えよ。

- (あ) 標的 DNA 配列の配列特異的な切断を誘導する。
- (い) 標的 RNA 配列の配列特異的な切断を誘導する。
- (う) 標的アミノ酸配列の配列特異的な切断を誘導する。
- (え) タンパク質 X に結合して、その機能を阻害する。
- (お) 細胞内に存在するタンパク質 X の働きを完全に抑制できる。

2) RNA 干渉の結果、ES 細胞の増殖は著しく阻害された。花子さんはタンパク質 X が細胞周期に関わっている可能性を考えてフローサイトメトリー解析を行い、図 2 の結果を得た。この結果の解釈として最も適切な記述を以下の選択肢の中から答えよ。なお、グラフの横軸は染色体 DNA の量を反映するヨウ化プロピジウム (PI) の蛍光強度を表しており、図中の 2n、4n は細胞のゲノムの倍数性を表している。

- (あ) X の機能抑制の結果、アポトーシスが引き起こされた。
- (い) X の機能抑制の結果、 G_0/G_1 停止が引き起こされた。
- (う) X の機能抑制の結果、S 期の進行が著しく遅延した。
- (え) X の機能抑制の結果、 G_2/M 停止が引き起こされた。
- (お) X の機能抑制は細胞周期にほとんど影響を及ぼさなかった。

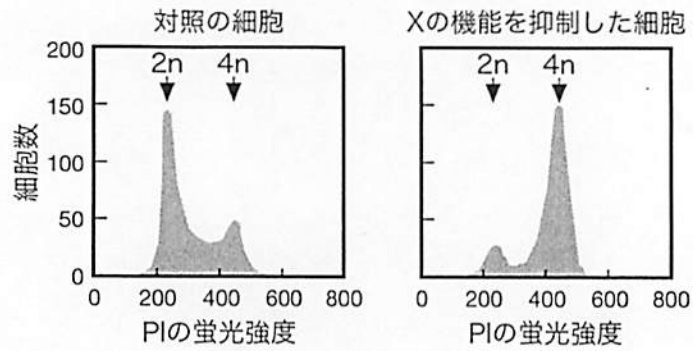


図2 フローサイトメトリー解析の結果

3) 花子さんは次に、タンパク質Xとタンパク質Yの相互作用を解析しようと考えたが、実験方法について迷っている。免疫沈降法、酵母ツーハイブリッド法、蛍光共鳴エネルギー移動 (FRET) 法、等温滴定カロリメトリ (ITC) 法、表面プラズモン共鳴 (SPR) 法、水晶振動子マイクロバランス (QCM) 法、蛍光偏光法、分析超遠心法という8種類の実験法の中から二つを選び、タンパク質間相互作用の測定の仕組みをそれぞれ3行程度で書け。文章とは別に、図を補足説明に用いてもよい。

③ DNA 複製機構に関する次の文を読み、以下の I～IV の間に答えよ。

生物や細胞がその機能を維持しながら生存するためには正確な DNA 複製が重要で、複製時のエラーによって生じる変異は最小限に抑えられている。DNA 複製がおこなわれる場所は局所的に二本鎖がほどけた Y 字構造をとっており、これは (ア) と呼ばれている。(ア) では鋳型となる二本鎖のそれぞれに対して、(イ) がその相補的なヌクレオチドを重合していくことで DNA 複製が進められる。ただ、二本鎖の DNA は方向が互いに逆向きであるのに対し、(イ) は 5'→3' 方向にしか合成をおこなわない。そのため DNA 複製は (ア) の進行と同じ方向に合成される (ウ) 鎖と、その逆方向に合成される (エ) 鎖に分けておこなわれる。(エ) 鎖上では、プライマーゼが (オ) をある間隔で合成し、そこから (カ) と呼ばれる短い DNA 断片を 5'→3' 向きに合成する。その後、(エ) 鎖上にできた多数の (カ) を (キ) がつなぎ合わせることで、複製が完了する。この DNA 複製には、間違った塩基対形成をした際に働くいくつかの校正機構が存在する。中でも、(イ) のもつ (ク) 活性はその中心的な役割を果たしており、合成中の 3' 末端に間違ったヌクレオチドが取り込まれてしまった場合、正常に塩基対形成をしていない残基を切り取り自己修復する。この複製過程において取り除かれなかったエラーについては、さらに別の修復系が働くことで取り除かれていく。このようにして生物の DNA 情報は極めて正確に後世代へと伝えることが可能となる。

I. 文章中の (ア)～(ク) に入るもっとも適切な語句を答えよ。ただし、(イ)、(キ)、(ク) は酵素名を答えよ。

II. 二本鎖 DNA の複製は、鋳型鎖と新生鎖がセットで新たな二本鎖を作る「半保存的モデル」に基づいている。これを実験的に示したメセルソン・スタールの実験について、以下の語句をすべて用いて 5～7 行程度で説明せよ。

^{14}N 、 ^{15}N 、鋳型鎖、新生鎖、大腸菌、培養、第 1 世代、第 2 世代、遠心分離

III. 上記の通り DNA 複製は極めて低い変異率を達成している。一方、インフルエンザウイルスなどの一部のウイルスは RNA をゲノムとして用いている。これらのウイルスが RNA をゲノムとしてもつ進化的な意義を 3～5 行程度で考察せよ。

IV. DNA 複製における変異率はゲノムの領域にかかわらず一定である。ところがゲノムの進化速度（変異の蓄積する速度）はゲノム中の領域により大きく異なる。どのようなゲノム領域では進化速度が遅く、またどのような領域では進化速度が速いのか、その理由も含めて5行程度で説明せよ。

④ 次の文を読み、以下の I および II の間に答えよ

I. 真核細胞のオルガネラ（細胞内小器官）であるミトコンドリアや葉緑体は、それぞれ固有のゲノムをもち、細胞核とは独立した転写・翻訳系により遺伝情報の発現を行っている。これは、これらオルガネラが細胞内共生したバクテリアに由来するためと考えられている。例えば、細胞核には一般に3種類の RNA ポリメラーゼが存在し、^(a) 転写する遺伝子の機能に応じた使い分けが見られるのに対し、共生により進化した藻類の葉緑体 RNA ポリメラーゼはバクテリアと同様に（ア）種類である。その一方で、ミトコンドリアや葉緑体のゲノムは祖先バクテリアのゲノムと比較すると小さく、コードされる遺伝子の数も非常に少ない。これは^(b) 多くのオルガネラ遺伝子が核ゲノムに移動し、遺伝子産物が^(c)細胞質でタンパク質として合成された後に、対応するオルガネラ内に輸送され、機能するように進化したことによる。

1) 下線部(a)に関して、細胞核の3種類の RNA ポリメラーゼの機能分担について簡潔に説明せよ。

2) (ア)に入る適切な数字を答えよ。

3) 下線部(b)に関して、rRNA や tRNA などの RNA をコードするオルガネラ遺伝子は、例外を除き核ゲノムに移動していない。その理由を考察して簡潔に説明せよ。

4) 下線部(c)に関して、細胞質で合成された後にミトコンドリアや葉緑体内に輸送されるタンパク質の特徴と輸送過程について、4行程度で説明せよ。

5) リボゾームは mRNA の配列情報に基づいてタンパク質を合成する分子装置である。この翻訳過程の特徴について、真核細胞の細胞質とバクテリアを比較した時の相違点を二つ示し、それぞれ簡潔に説明せよ。

II. 光合成は葉緑体の主要な生理機能であるが、この機能構築には細胞核のみならず、葉緑体のゲノムにコードされた遺伝情報も必要である。このように、ある表現型が細胞核以外の遺伝情報に起因することを（イ）遺伝という。ある被子植物において、細胞核ゲノムの常染色体上にコードされる遺伝子 A、葉緑体ゲノムにコードされる遺伝子 B は光合成機能に重要であり、どちらか一つでも欠損すると光合成機能が低下することが知られている。ここで、以下の実験を行った。

【実験】光合成機能の低下した 2 種の変異株、X 株と Y 株を用いて交配実験を行った。遺伝子型を調べたところ、X 株のもつ A 遺伝子は全て欠損変異型であり、B 遺伝子は全て野生型であった。また、Y 株のもつ B 遺伝子は全て欠損変異型であり、A 遺伝子は全て野生型であった。さらに A 遺伝子、B 遺伝子ともに、野生型は欠損変異型の対立遺伝子に対して優性であることが判っている。この時、(d) X 株の花粉を Y 株のめしべに受粉させた場合と、(e) Y 株の花粉を X 株のめしべに受粉させた場合で F1 世代における表現型が異なっていた。

- 1) (イ) に入る適切な語句を答えよ。
- 2) 【実験】について、下線部(d)の場合、下線部(e)の場合それぞれの F1 世代の表現型を、光合成機能に注目して答えよ。
- 3) 【実験】の結果を例とするような、配偶子の性により次世代の表現型の分離比が異なる遺伝形式を何と呼ぶか、答えよ。

⑤ 以下のIおよびIIの問に答えよ。

I. 分子式 $C_6H_{12}O_2$ の化合物 A~D、および、それ以外の分子式をもつ X、Y についての記述 i)~iii)を読み、以下の問 1) および 2) に答えよ。

i) テトラメチルシランを標準物質として 100%重水素化されたジメチルスルホキシド (重 DMSO) 中で化合物 A~C の 1H NMR (300 MHz) を室温で測定したところ、それぞれ以下のシグナルが観測された。

化合物 A

δ 3.8 ppm 付近 (2 プロトン分, 二重線), δ 2.1 ppm 付近 (3 プロトン分, 一重線),
 δ 1.7 ppm 付近 (1 プロトン分, 多重線), δ 0.9 ppm 付近 (6 プロトン分, 二重線)

化合物 B

δ 3.4 ppm 付近 (2 プロトン分, 三重線), δ 3.2 ppm 付近 (3 プロトン分, 一重線),
 δ 2.4 ppm 付近 (2 プロトン分, 三重線), δ 2.1 ppm 付近 (3 プロトン分, 一重線),
 δ 1.7 ppm 付近 (2 プロトン分, 多重線)

化合物 C

δ 4.2 ppm 付近 (2 プロトン分, 三重線), δ 2.2 ppm 付近 (2 プロトン分, 四重線),
 δ 1.7 ppm 付近 (2 プロトン分, 多重線), δ 1.2 ppm 付近 (3 プロトン分, 三重線),
 δ 1.0 ppm 付近 (3 プロトン分, 三重線)

ii) 分子式 C_6H_{10} の化合物 X を四酸化オスミウムと反応させたのち、亜硫酸水素ナトリウム水溶液で処理すると、主生成物として化合物 D が得られた。

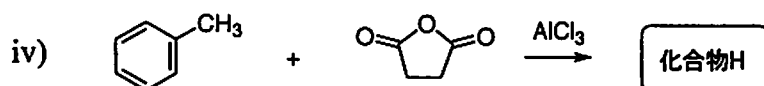
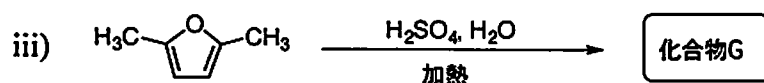
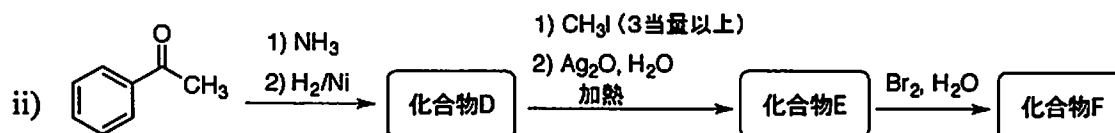
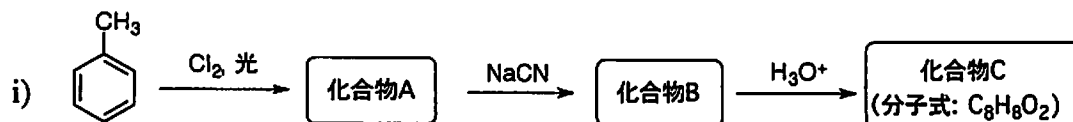
iii) 化合物 D を過ヨウ素酸と水で処理すると、不斉炭素をもたない化合物 Y のみが生成した。この化合物 Y の 1H NMR (300 MHz, 重 DMSO) を室温で測定したところ、9.7 ppm 付近には 2 プロトン分のシグナルが観測された。また、この 1H NMR ではメチル基 ($-CH_3$) のシグナルは観測されなかった。

1) 化合物 A~D の化学構造式を描け。ただし、不斉炭素をもつ化合物については、その立体化学がわかるように描け。

2) 次の1~5の記述のうち正しいものをすべて選べ。また、正しいものがない場合は、「なし」と書け。

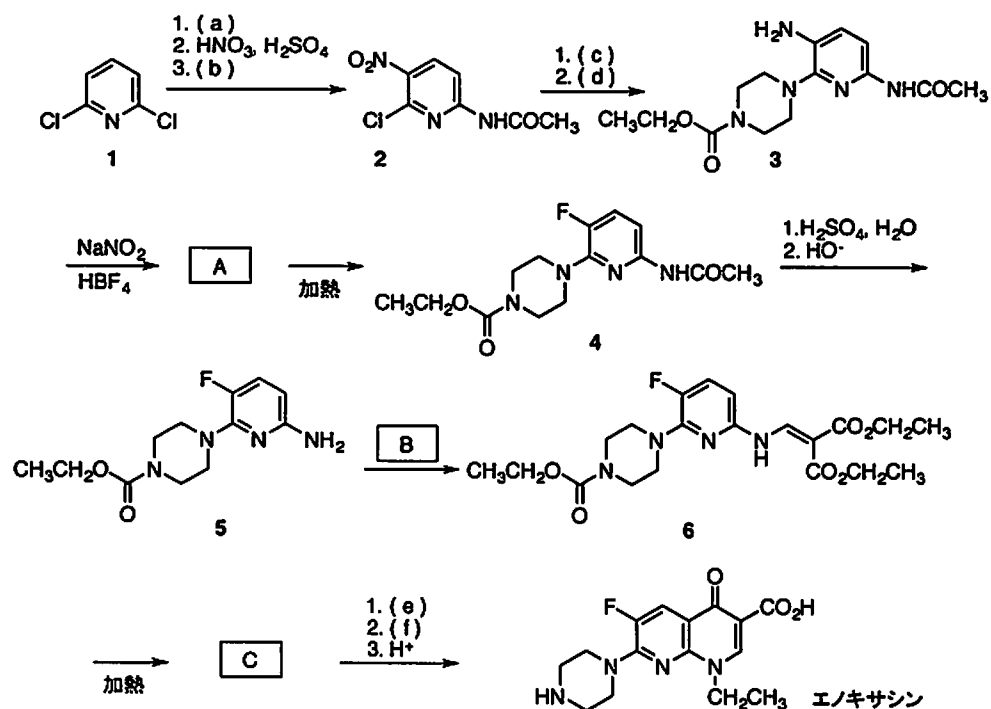
1. 化合物A~Dの中には、光学活性な分子はない。
2. 化合物Aは、3-メチルブタン酸とメタノールを N,N' -ジシクロヘキシルカルボジイミドを用いて反応させると得られる。
3. 化合物Bの赤外吸収スペクトルを測定すると、 2250 cm^{-1} 付近に強い吸収が観測される。
4. 化合物Cに十分な量の水素化アルミニウムリチウムを反応させたのち、酸処理を行うと2種類のアルコールが生成する。
5. 化合物Dは、化合物Xとメタククロ過安息香酸を反応させたのち、さらに水酸化ナトリウム水溶液で処理しても、主生成物として得られる。

II. 次の合成経路 i) ~iv) のそれぞれの反応で主生成物として得られる化合物A~Hに当てはまる化合物を化学構造式で答えよ。ただし、光学異性体は考慮しなくてよい。

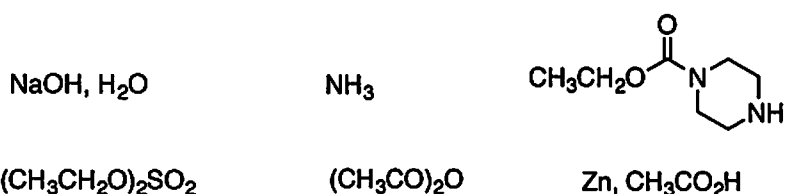


⑥ 以下のIおよびIIの間に答えよ。

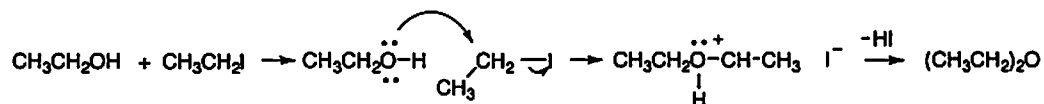
I. キノロン系抗菌薬であるエノキサシンの合成経路を以下に示した。



- 1) IUPAC 命名法による化合物 1 の名称を記せ。日本語でも英語でもよい。
- 2) 上の合成スキームにおいてエノキサシンを最も効率よく合成するために、(a) ~ (f) に適した試薬を次の六つの試薬群からそれぞれ選んで答えよ。

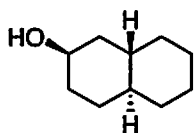


- 3) 化合物 A の化学構造式を描け。
- 4) 化合物 5 から化合物 6 への変換反応において必要な試薬 B は、マロン酸ジエチルとオルトギ酸エチルより合成することができる。試薬 B の化学構造式を描け。
- 5) 化合物 C の化学構造式を描くとともに、加熱により化合物 6 から化合物 C とエタノールが生成する環化反応の機構を下記の例にならって示せ。

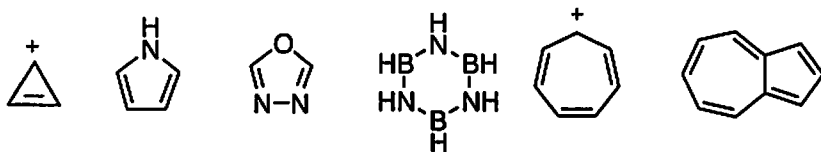


II. 次の記述 1~5 のうち正しいものをすべて選べ。また、正しいものがない場合は、「なし」と書け。

1. 次の化合物の二つの6員環はそれぞれ、いす型配座をとり、ヒドロキシ基はエクアトリアル位を占めている。



2. 水中において、2-メチル-2-プロパノールはメタノールより酸性度が低い。
3. 1,2-ジメチルシクロヘキサンには、立体配座に関わる異性体を除けば、三つの立体異性体がある。
4. 3-クロロトルエンに液体アンモニア中 NaNH_2 を反応させると2種類の生成物が得られる。
5. 次に示した六つの化学種はすべて芳香族性をもつ。



⑦ 熱力学的性質に関する I~VIII の間に答えよ。

系を物質量 n の純気体とし、その系は外界（周囲）と接触しているとする。系と外界を合わせて全系と呼ぶ。外界としては、力学的なエネルギーの出入りのみが許される力学的外界と、熱の出入りのみが許される熱的外界を考える。系の体積を V 、温度を T 、圧力を p 、内部エネルギーを U 、エントロピーを S とする。

はじめ、系は一定の体積 V_1 、一定の温度 T_1 、一定の圧力 p_1 に保たれており、これを状態 I とする。

I. 状態 I では系と熱的外界が平衡に保たれている。このとき、接触している熱的外界の温度を答えよ。

II. 状態 I で系が力学的外界と平衡に保たれているとき、外圧 p_{ex} を答えよ。

次に、系が状態 (V, T) から状態 $(V+dV, T+dT)$ に微小変化する過程を考える。このとき、系が力学的外界からなされる仕事を dw 、熱的外界から得る熱を dq とし、系の内部エネルギー変化を dU とすると、 $dU = dw + dq$ である。仕事を体積変化による仕事に限ると、外圧 p_{ex} を用いて $dw = -p_{\text{ex}}dV$ と表せる。

III. 系の V から $V+dV$ への変化が可逆的な過程である場合に、系がなされる仕事を dw_{rev} とする。この場合、 dw_{rev} と dV の関係はどう表せるか。また、そう表せる理由を述べよ。

IV. III の過程において系が受け取る熱量を dq_{rev} とする。 dq_{rev} を系のエントロピー変化 dS を含む式で表せ。

V. III の過程において外界のエントロピー変化 dS_{sur} を dq_{rev} を含む式で表せ。

VI. III の過程において dS を dU と dV に関係付ける式を $dS = \dots$ の形で導け。ただし誘導過程も示せ。

系が状態 1 (V_1, T_1) から状態 2 (V_2, T_2) へ変化するとき、系がなされる仕事 W は $\int_{1 \rightarrow 2} (-p_{\text{ex}})dV$ であり、系が受け取る熱量 Q は $\int_{1 \rightarrow 2} dq$ である。ただし、積分記号の添字「 $1 \rightarrow 2$ 」は特定の経路に従っての積分を示す。また、系と外界のエントロピー変化をそれぞれ ΔS 、 ΔS_{sur} とする。

VII. 状態 1 から状態 2 への変化が可逆的である場合には、系がなされる仕事 W_{rev} は、 p の関数を変数 V で積分する式で表せる。ここで、積分には始点と終点だけを指定すればよく、両者の間の経路を指定する必要がない。その理由を p と p_{ex} の違いに基づいて述べよ。

VIII. 状態 1 から状態 2 への変化が自発的に起きる条件を、エントロピーを用いて示せ。

⑧ 周期表第二周期の原子に関する I~VI の問に答えよ。

I. 図 1 の(a)~(c)では、1s、2s、2p オービタルのおよそのエネルギー準位を横線で表し、そこに 6 個の電子を配置させた。ただし、2p オービタルは 3 重に縮退しており、上向きおよび下向きの矢印は、それぞれ α および β スピンを表している。これらの中で、炭素原子 C の基底状態に対応する電子配置はどれか。また、この電子配置のとき、炭素の原子価はいくつと考えられるか。

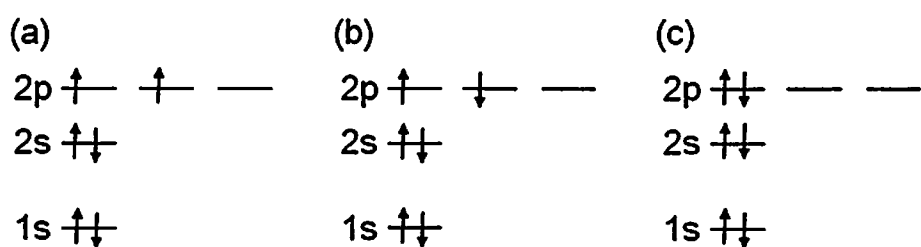


図 1

II. 炭素原子の第一励起状態の電子配置を図 1 に倣って示せ。

III. 炭素原子の原子価は分子中では最大 4 価の値をとる。この理由を昇位と混成という用語を必ず使って 2~3 行程度で説明せよ。

IV. 図 1 に倣って、窒素 N および酸素 O の基底状態の電子配置を示せ。

V. ある元素の等核二原子分子を考える。その二つの原子を A_1 、 A_2 と表す。原子オービタルの対称性のみを考慮したとき、次の組み合わせ (ア) ~ (コ) を以下の三つに分類せよ。1) σ 結合の形成に寄与する組み合わせ、2) π 結合の形成に寄与する組み合わせ、3) 結合形成に寄与しないと考えられる組み合わせ。ただし、結合軸を z 軸方向にとるものとする。

		A ₂ の原子オービタル			
		2s	2p _x	2p _y	2p _z
A ₁ の原子オービタル	2s	(ア)	—	—	—
	2p _x	(イ)	(ウ)	—	—
	2p _y	(エ)	(オ)	(カ)	—
	2p _z	(キ)	(ク)	(ケ)	(コ)

VI. 次の文章中の（ア）～（チ）に入る最適な語句または数値などを下の語句群から選択せよ。ただし、同じものを二回以上用いてもよい。

酸素分子 O_2 の分子オービタルのエネルギー準位は、およそ図2のように与えられる。このエネルギー準位図に、 O_2 のもつ（ア）個の原子価電子を（イ）の原理と（ウ）の規則にしたがって収容していくと、不対電子スピンの（エ）個生じる。それゆえ、 O_2 は（オ）物質である。

窒素分子 N_2 の場合は、図2の $1\pi_u$ と $2\sigma_g$ のエネルギー準位が逆転する。上と同様に原子価電子を収容していくと、 N_2 では結合性オービタルと反結合性オービタルにそれぞれ（カ）個、（キ）個の電子が存在するので、結合次数は（ク）となり、非常に安定であることがわかる。大気中の N_2 を還元して NH_3 をすることを窒素固定というが、これには大量のエネルギーを必要とし、ある種の細菌やアーキアだけが実行できる。

代謝過程の間に、 O_2 は還元されて超酸化物イオン O_2^- になる。 O_2^- の基底状態の電子配置から、このイオンは結合次数（ケ）のラジカルである。この超酸化物イオンは細胞成分に害を及ぼすので除去しなければならない。生体中では、スーパーオキシドジスムターゼという酵素が O_2^- を O_2 と H_2O_2 にする不均化反応を触媒する。

一酸化窒素 NO は、細胞間を迅速に拡散し、血圧調整や血小板凝集の阻害、炎症や免疫系への攻撃に対抗する防御など様々な過程に関与する。NOの最高被占オービタルは（コ）型の（サ）性オービタルで電子を（シ）個含む。このオービタルのエネルギー準位は（ス）原子の（セ）オービタルよりも（ソ）原子の（タ）オービタルに近いので、不対電子は（チ）原子の側に局在している。

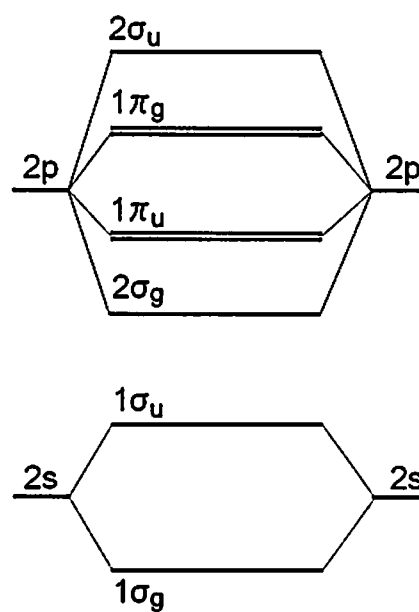


図2

[語句群]

1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 1/2, 3/2, 5/2, 不確定性, 対応, ハイゼンベルグ, パウリ, シュレーディンガー, フント, ボルン, 導電性, 常磁性, 反磁性, 非磁性, σ , π , 2s, 2p, 結合, 反結合, 非結合, C, N, O