

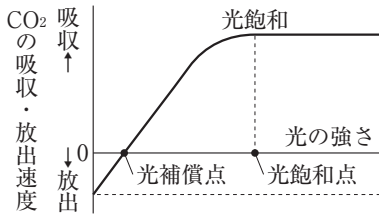
第12講 光合成と化学合成

基礎学習

単純な物質から複雑な物質を合成する過程を同化とよび、二酸化炭素を取り込んで有機物を合成する炭酸同化、アンモニウムイオンなどを取り込んで有機窒素化合物を合成する窒素同化が代表的である。同化にはエネルギーが必要で、光エネルギーを用いる炭酸同化を光合成という。

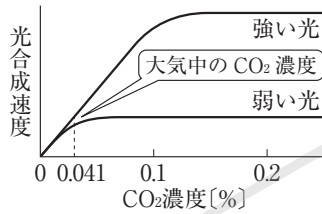
1 光合成と環境要因

① 光の強さと光合成速度



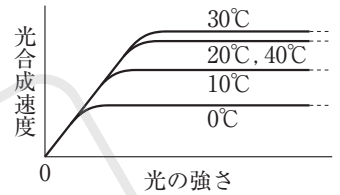
- ・光補償点
光合成速度 = 呼吸速度 の照度
- ・光飽和点以下の照度
光合成速度は照度にほぼ比例。
光の強さが限定要因
- ・光飽和点以上の照度では光合成速度が一定。
温度、CO₂濃度が限定要因

② 二酸化炭素濃度と光合成速度



- ・強光時はCO₂が高濃度になるまで → 光合成速度が増加する。
増加している範囲では、CO₂濃度が限定要因
- ・弱光時は、CO₂が低濃度で → 光合成速度は増加しなくなる。
光の強さが限定要因

③ 温度と光合成速度



- ・高温時は、光が強くなるまで → 光合成速度が増加する。
増加している範囲では、光の強さが限定要因
- ・低温時は、弱い光のときに → 光合成速度は増加しなくなる。
温度が限定要因

2 光エネルギーをとらえるしくみ

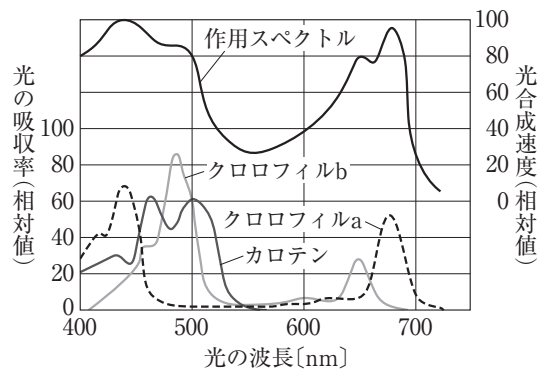
●光合成色素

光合成に利用するために光エネルギーを吸収する色素。

- クロロフィル…クロロフィル a (青緑色) → 主色素
クロロフィル b (黄緑色～緑色)
- カロテノイド…カロテン (橙色), キサントフィル (黄色～褐色)

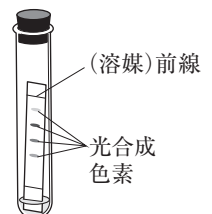
●吸収スペクトル・作用スペクトル

吸収スペクトル…各波長の光の吸収率のグラフ。
作用スペクトル…光の波長による光合成速度の変化を示したグラフ。各色素の吸収スペクトルの波形の合計に近い形。



●光合成色素の分離

アセトンなどからなる展開液に、葉から抽出した光合成色素を溶かし、展開液への溶けやすさの違い(脂溶性が高いと溶けやすい)によって色素ごとに分離することができる。この方法を一般にクロマトグラフィーといい、様々な光合成生物に含まれている光合成色素を調べることができる。



3 光合成の過程

●チラコイドでの過程と、ストロマでの過程(カルビン・ベンソン回路)

〔チラコイド…葉緑体内部にある。光合成色素を含む。
ストロマ…葉緑体内部のチラコイド以外の部分(基質)。各種の酵素が含まれる。〕

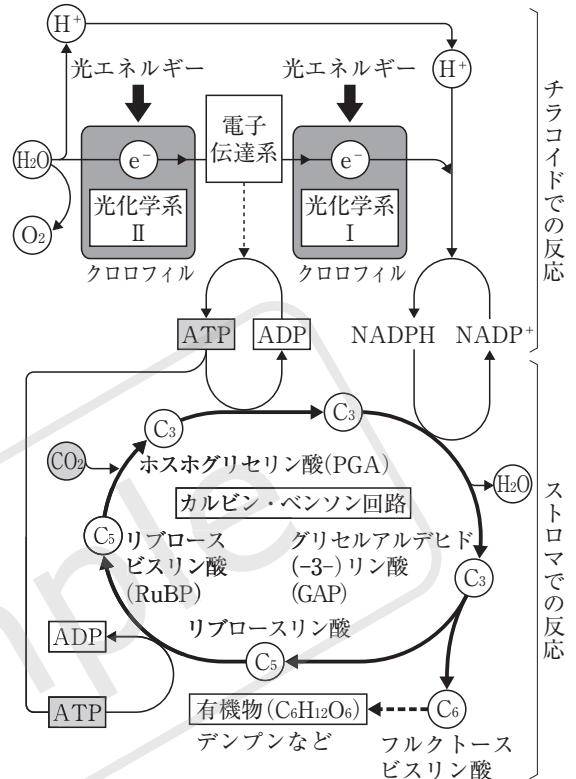
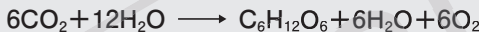
① チラコイドでの反応

- ・光エネルギーでクロロフィルが活性化。
→電子(e⁻)が飛び出て電子伝達系へ。
- ・水が分解されe⁻, H⁺, O₂が生じる。=光化学系II
- ・電子伝達系を流れたe⁻は、H⁺, NADP⁺と結合し、NADPHをつくる。=光化学系I
→H₂Oの分解で生じた水素イオンの濃度勾配を利用してATPを合成(光リン酸化)。

② ストロマでの反応

- ・CO₂はリブローズビスリン酸(炭素数5)と結合。
→2分子のホスホグリセリン酸(炭素数3)になる。
- ・CO₂からC₆H₁₂O₆をつくるのは同化かつ還元反応であり、エネルギーとしてATPを、還元力としてNADPHを消費する。
- ・グリセルアルデヒド(-3-)リン酸を経て、デンプンなどの有機物がつくられる。

光合成全体の反応式



4 同化産物の輸送

●同化デンプン

葉緑体でつくられたときのデンプン。葉緑体内部に一時的に貯蔵される。

●転流

葉脈・茎・根にある篩管を通して運ばれること。デンプン(不溶性)からスクロース(水溶性)に変化して輸送される。

5 光合成と化学合成

光合成は、光エネルギーを用いて炭酸同化を行う反応といえる。これに対し化学合成は、化学エネルギーを用いて炭酸同化を行う反応である。光合成に用いられる光エネルギーは主に太陽からもたらされるものであり、化学合成に用いられる化学エネルギーは無機物の酸化によって得られるものである。化学合成を行うのはすべて細菌である。

●光合成細菌

- ・シアノバクテリア…植物と同じく、水H₂Oを分解して酸素O₂を発生する光合成を行う。
- ・緑色硫黄細菌 紅色硫黄細菌…水ではなく、硫化水素H₂Sを分解して硫黄Sを発生する光合成を行う。

●化学合成細菌

- ・硝化菌…アンモニアNH₃を酸化して亜硝酸HNO₂を生じたり(亜硝酸菌)、亜硝酸HNO₂を酸化して硝酸HNO₃を生じたりする(硝酸菌)など、窒素を含む無機物を酸化して得られる化学エネルギーを用いて炭酸同化を行う。

>>> 確 認 問 題 <<<

次の文を読んで、〔 〕にあてはまる言葉や数字を答えよ。〔 〕内に選択肢がある場合、選択肢から適当なものを選べ。

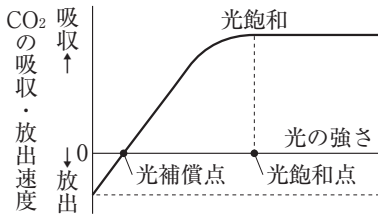
- (1) 陸上植物が行う光合成とは、〔① 〕を用いて、二酸化炭素と〔② 〕から有機物(炭水化物)がつくられ〔③ 〕が発生する過程である。化学反応としての光合成は、反応物である二酸化炭素や、太陽からもたらされる〔④ 〕エネルギーの量、そして温度の影響を強く受ける。〔④ 〕エネルギーや温度が十分であっても、二酸化炭素が不足すると光合成速度はその分〔⑤ 低下する ・ 上昇する 〕。このように、光合成速度が二酸化炭素や〔④ 〕エネルギー、温度のうちもっとも不足する環境要因の影響を受けるとき、その要素を〔⑥ 〕要因という。ある環境要因が光合成速度の〔⑥ 〕要因となっているとき、その環境要因を補うと、光合成速度はその分〔⑦ 低下する ・ 上昇する 〕。
- (2) 植物のもつ色素には、緑色を呈する〔⑧ 〕と、黄色から橙色を呈するカロテン類やキサントフィル類を総称した〔⑨ 〕がある。〔⑧ 〕には、〔⑧ 〕aや〔⑧ 〕bなどがある。ホウレンソウを茹でると茹で汁が緑色になるが、ニンジン茹でても茹で汁が橙色になることはない。このことから、〔⑧ 〕と〔⑨ 〕とを比べて水溶性が高いのは〔⑩ 〕であるとわかる。このように、色素ごとの溶媒への溶けやすさなどの違いを利用して色素の分離・精製を行う方法を、一般に〔⑪ 〕という。
- (3) 光合成によって、二酸化炭素 CO_2 からグルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ が生じる過程を化学的に考えてみよう。
炭素の酸化数は、二酸化炭素では〔⑫ 〕、グルコースでは〔⑬ 〕であるから、二酸化炭素は〔⑭ 酸化 ・ 還元 〕されていることがわかる。また、二酸化炭素からグルコースが生じる過程は、簡単な物質から複雑な物質が生じる過程であることから、この過程は〔⑮ 同化 ・ 異化 〕であり、エネルギーが〔⑯ 吸収 ・ 放出 〕される過程であることがわかる。
二酸化炭素を〔⑭ 〕するには〔⑭ 〕力が必要であり、〔⑮ 〕反応が起こるにはエネルギーが必要である。光合成においてこの〔⑭ 〕力を担う物質は、〔⑭ 〕型補酵素である〔⑰ $\text{NADH} \cdot \text{NADPH}$ 〕であり、エネルギーを担う物質は〔⑱ 〕である。
- (4) 光合成において、二酸化炭素 CO_2 からグルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ が生じる過程で必要な NADPH (還元力)と ATP (エネルギー)がどこからもたらされるのかを考えてみよう。
葉緑体の〔⑲ 〕膜上には、光化学系Ⅱ、電子伝達系、光化学系Ⅰとよばれる反応系が存在している。光化学系Ⅱでは光が当たると〔⑳ 〕の分解が起こり、水素イオンと〔㉑ 〕が生じ、気体の〔㉒ 〕が発生する。〔㉑ 〕が電子伝達系のタンパク質間を受け渡される過程でエネルギーが放出され、このエネルギーを用いて水素イオンが〔⑲ 〕内へと移動し、〔⑲ 〕内の水素イオン濃度が上昇する。ミトコンドリアの電子伝達系と同様、ここでも水素イオンが〔㉓ 〕酵素を通過して〔㉔ 〕側へと戻ること、 ATP が合成される。電子伝達系を通過した〔㉑ 〕は光化学系Ⅰへと受け渡され、光化学系Ⅰでは光が当たると〔㉕ 〕側の水素イオンと〔㉑ 〕が NADP^+ へと受け渡されることで、 NADPH が合成される。
つまり、二酸化炭素 CO_2 からグルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ が生じる過程で必要な NADPH (還元力)は〔㉖ 光化学系Ⅱ ・ 電子伝達系 ・ 光化学系Ⅰ〕で、 ATP (エネルギー)は〔㉖ 光化学系Ⅱ ・ 電子伝達系 ・ 光化学系Ⅰ〕と〔㉗ 光化学系Ⅱ ・ 電子伝達系 ・ 光化学系Ⅰ〕で形成した水素イオンの濃度勾配を利用して合成されており、この水素イオンは〔㉗ 光化学系Ⅱ ・ 電子伝達系 ・ 光化学系Ⅰ〕での水の分解によって生じている。

- (5) 光合成の電子伝達系と、呼吸の電子伝達系の共通点と相違点について整理してみよう。
- 光合成の電子伝達系にもたらされる電子と水素イオンは、光化学系Ⅱで水を〔28 酸化 ・ 還元〕して生じたものである。一方、呼吸の電子伝達系にもたらされる電子と水素イオンは、還元型補酵素であるNADHやFADH₂を〔29 酸化 ・ 還元〕して生じたものである。
- 電子が電子伝達系のタンパク質間を受け渡され、その際に発生するエネルギーを用いて水素イオンを〔30 〕輸送する点は光合成と呼吸で共通しており、さらにATP合成酵素を通した水素イオンの〔31 〕輸送によってATPの合成が行われる点も共通している。
- 光合成の電子伝達系を流れた電子はその後、光化学系Ⅰにおいて〔32 〕の還元に使われ、還元型補酵素である〔33 〕が生じる。一方、呼吸の電子伝達系を流れた電子はその後、〔34 〕の還元に使われ水が生じる。
- (6) 光合成のカルビン・ベンソン回路の過程を化学的に考えてみよう。
- リブローズビスリン酸(RuBP)は1分子の中に炭素原子を〔35 〕個含む。リブローズビスリン酸は二酸化炭素と結びつき、ホスホグリセリン酸(PGA)となる。ホスホグリセリン酸は1分子の中に炭素原子を〔36 〕個含むため、6分子のリブローズビスリン酸が6分子の二酸化炭素と結びつくと、ホスホグリセリン酸が〔37 〕分子生じる。
- ホスホグリセリン酸はATPのエネルギーとNADPHの還元力によって還元され、グリセルアルデヒド-3-リン酸(GAP)になる。グリセルアルデヒドリン酸は1分子の中に炭素原子を〔38 〕個含むため、〔37 〕分子のホスホグリセリン酸から12分子のグリセルアルデヒドリン酸が生じる。
- 12分子のグリセルアルデヒドリン酸からは、再び6分子のリブローズビスリン酸が生じる。このとき、12分子のグリセルアルデヒドリン酸に含まれる炭素原子は〔39 〕個、6分子のリブローズビスリン酸に含まれる炭素原子は〔40 〕個であり、その差にあたる炭素原子6個分が、〔41 〕分子のグルコースとしてカルビン・ベンソン回路から出ていく。
- すなわちカルビン・ベンソン回路は結局のところ、6分子の二酸化炭素が、〔41 〕分子のグルコースになる過程であるといえることができる。
- (7) 植物細胞を構成する有機物の中で最も多いものは〔42 炭水化物 ・ タンパク質〕であり、植物は光合成産物を貯蔵する際は、主に〔43 〕として貯蔵する。〔43 〕は、光合成が行われた葉でつくられ、葉の細胞の中にも貯蔵されるが、師管を通して植物体の各部に運ばれる際は〔44 〕に変換される。このとき、光合成産物が師管を通して植物体の各部に運ばれることを〔45 〕という。
- (8) 光合成とは〔46 〕エネルギーを用いて炭酸同化を行うことである。一方、化学合成とは〔47 〕エネルギーを用いて炭酸同化を行うことである。植物と同様、水を酸化して酸素を放出する光合成を行う細菌を〔48 〕といい、他方、バクテリアオクロフィルとよばれる光合成色素をもち、〔49 〕を酸化して〔60 〕を放出する光合成を行う細菌には〔51 〕などがある。また、化学合成を行う細菌を〔52 〕という。
- (9) 化学合成で使われる化学エネルギーは、〔53 有機物 ・ 無機物〕を酸化して得られる化学エネルギーである。例えば亜硝酸菌は、〔54 〕を酸化して〔55 〕にする過程で放出される化学エネルギーを用いて有機物を合成し、その有機物を〔66 同化 ・ 異化〕して放出されるエネルギーを様々な生命活動に利用している。

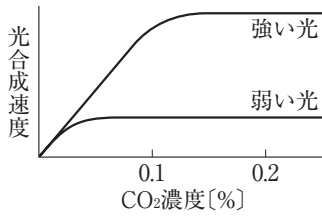
基本問題

1 下図は、様々な条件下で光合成速度を測定したものである。図を参考にあとの問いに答えよ。

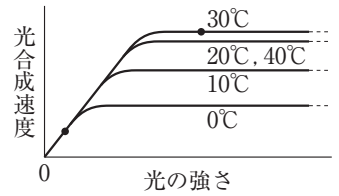
① 光の強さと光合成速度



② 二酸化炭素濃度と光合成速度



③ 温度と光合成速度



- (1) ①の光補償点と光飽和点とはどのような光の強さか。簡潔に答えよ。
- (2) 次のa～eのうち、グラフの読み取りについて正しく述べたものをすべて選べ。
 - a ①では、光の強さが光補償点以上・光飽和点以下のとき、光の強さによって光合成速度が変化しているの、光の強さは限定要因ではない。
 - b ①では、光の強さが光補償点以上・光飽和点以下のとき、光の強さによって光合成速度が変化しているの、光の強さは限定要因である。
 - c ②では、強い光のもとではCO₂濃度が0.1以下のとき、CO₂濃度によって光合成速度が変化しているの、CO₂濃度が0.1以下のとき、CO₂濃度が限定要因である。
 - d ②では、CO₂濃度が0.1以上のとき、光の強さによって光合成速度が変化しているの、CO₂濃度が0.1以上のとき、光の強さは限定要因ではない。
 - e ③では、光の強さが十分大きいとき、温度によって光合成速度が変化しているの、光の強さが十分大きいとき、温度は限定要因である。

2 右図は、光合成の模式図である。次の問いに答えよ。

- (1) 図の「光エネルギーの変換」で行われていることとして正しくないものを、次のa～dから1つ選べ。

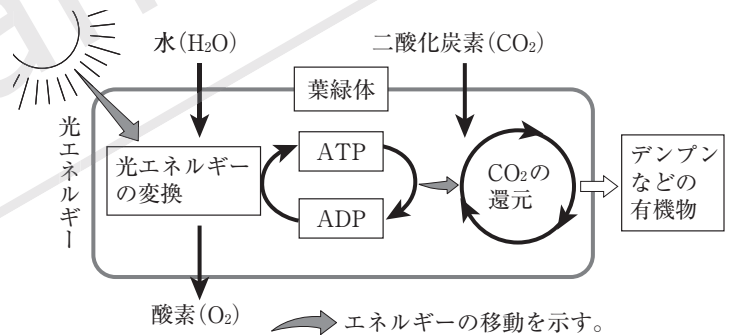
- a 水の酸化による還元力の発生
- b 光合成産物の分解によるATPの合成
- c H⁺の濃度勾配によるATPの合成
- d NADPHの合成

- (2) 図の「ATP」の合成はどこで行われるか。次のa～cから1つ選べ。

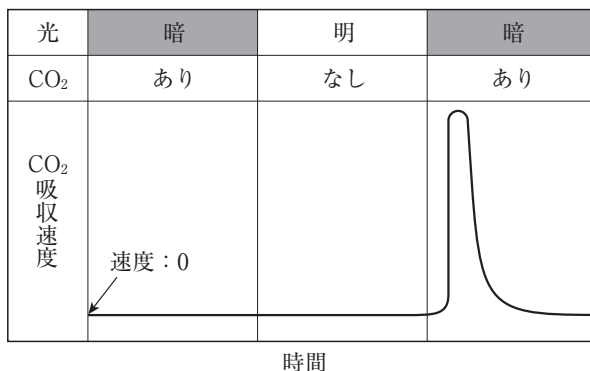
- a チラコイド膜のストロマ側
- b チラコイド膜上のチラコイド内腔側
- c 外膜と内膜の間

- (3) 図の「CO₂の還元」はどこで行われるか。次のa～cから1つ選べ。

- a ストロマ
- b チラコイド内腔
- c 外膜と内膜の間



3 右図は、植物を十分な時間、CO₂濃度が十分にある状態で暗所に置いたあと、一定時間、CO₂がない明るいところに置き、その後再度CO₂濃度が十分にある状態で暗所に置いた場合の、一連の過程におけるCO₂吸収速度をグラフにしたものである。次の①～④の理由として最も適当なものを、あとのa～cからそれぞれ1つずつ選べ。

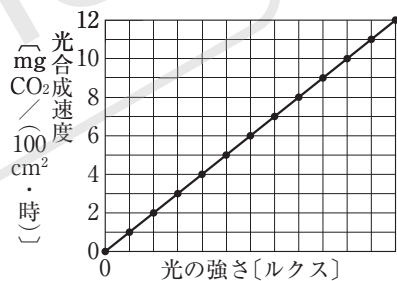


- ① はじめ、CO₂濃度が十分にある状態で暗所に置いた際に、CO₂吸収速度が上がらないこと。
- ② CO₂がない明るいところに置いた際に、CO₂吸収速度が上がらないこと。
- ③ 再度CO₂濃度が十分にある状態で暗所に置いた際、CO₂吸収速度が上がったこと。
- ④ 再度CO₂濃度が十分にある状態で暗所に置いてCO₂吸収速度が上がった後、再びCO₂吸収速度が0になったこと。

【理由】

- a 吸収するCO₂がないため。
- b 葉内に十分な量のATPやNADPHがないため。
- c 葉内に十分な量のATPやNADPHがあるため。

4 光の強さ以外の環境条件を一定に保ち、植物PとQの光合成速度(100 cm²の葉が、1時間あたりに吸収するCO₂の量[mg])と光の強さとの関係を調べた。植物Pでは、光の強さに比例して光合成速度が増加し、最も強い光のときに12 mgCO₂ / (100 cm²・時)であった(右図)。一方、植物Qでは、2500ルクスまでは光の強さに比例して光合成速度が増加したが、それ以上に光を強くしても光合成速度は変化しなかった。また、表には両植物の光補償点と葉の呼吸速度(100 cm²の葉が、1時間あたりに呼吸によって放出するCO₂の量[mg])を示した。これらのデータを用いて、次の問いに答えよ。ただし、呼吸速度は光の強さに関係なく一定とする。



植物Pにおける光の強さと光合成速度の関係

表 植物PとQの光補償点と呼吸速度

植物	光補償点 [ルクス]	呼吸速度 [mgCO ₂ / (100 cm ² ・時)]
P	2000	4.0
Q	500	1.5

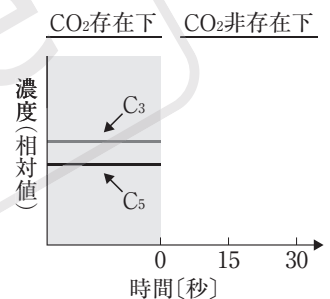
- (1) 図で、光の強さ(横軸)の1目盛りは何ルクスか。整数で答えよ。
- (2) 植物PとQに同じ強さの光を照射すると、ある強さのときに、両植物の見かけの光合成速度が等しくなる。このときの光の強さは何ルクスか、整数で答えよ。

演習問題

1 〈光合成の過程〉

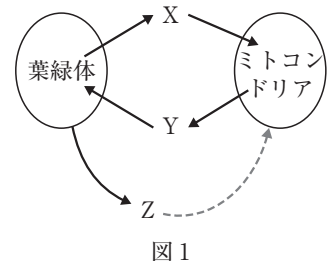
緑色植物の葉肉細胞には、葉緑体とよばれる光合成を行うための細胞小器官が存在する。葉緑体は二重膜で包まれた直径5～10 μmの粒状構造で、内部にはチラコイドとよばれる扁平な袋状の膜構造が発達しており、ところどころ重なって層状になっている。チラコイド膜にはクロロフィル a をはじめ、複数の光合成色素が存在しており、光エネルギーを効率よく吸収することができる。光合成の光化学反応は、このチラコイド膜で行われる。また、チラコイド膜以外の基質部分はストロマとよばれ、CO₂の固定反応が行われる。CO₂の固定反応には光化学反応を通じてチラコイド膜でつくられた「**ア**」と、ATPのエネルギーが使われる。CO₂は葉の「**イ**」から吸収され、葉緑体で⁽⁵⁾炭素数が5の化合物(C₅)と結合して炭素数が6の化合物(C₆)となったのち、すぐに2つに分かれて炭素数が3の化合物(C₃)になる。炭素数が3の化合物の一部からはグルコース(C₆)がつけられる。その後、数種類の化合物を経て再び⁽⁷⁾炭素数が5の化合物(C₅)が再生される。この反応回路は、発見者にちなんでカルビン・ベンソン回路とよばれる。光合成によりつくられた有機物の一部は「**ウ**」として一時的に葉緑体に蓄えられるが、必要に応じてスクロースなどの糖に代謝され、「**エ**」を通じて⁽⁸⁾葉から様々な器官に運ばれ利用される。

- (1) 「**ア**」～「**エ**」にあてはまる語句を答えよ。
- (2) 下線部あ)の構造の名称を答えよ。
- (3) 下線部い)の中でクロロフィル a とは異なる波長の光を吸収する色素の名称を2つ答えよ。
- (4) 下線部う)の化合物の名称を答えよ。
- (5) 下線部え)の糖などの有機物が運搬されることを何とよぶか答えよ。
- (6) カルビン・ベンソン回路で6分子のCO₂が固定されるとき、回路全体で使われるATPの分子数を答えよ。
- (7) 盛んに光合成をしている植物へのCO₂の供給を人為的に遮断した。その後の30秒間について、本文中の化合物(C₃とC₅)の相対的な濃度変化を示す線をかき、右のグラフを完成させよ。



2 〈呼吸と光合成〉

生体物質は合成と分解により絶えず変化する。これには細胞内の代謝活性が関係している。特に、葉緑体とミトコンドリアは物質・エネルギー代謝に重要である。図1は光照射した植物の葉緑体とミトコンドリアでの物質の出入りを模式的に示している。XとYは無機物、Zは有機物である。葉緑体はYを吸収してXを生じ、ミトコンドリアはXを吸収してYを生じる。葉緑体でつくられたZは「**ア**」という代謝経路を経て徐々に変化し、最後は「**イ**」という物質になってミトコンドリアの中に入って使われる。



- (1) 「**ア**」, 「**イ**」にあてはまる語句を答えよ。
- (2) 下線部のXとYは気体状の分子である。ここで、温度を10℃から40℃まで段階的に上げ、葉緑体から生じるXの量とミトコンドリアから生じるYの量を測定した。その結果を図2に示す。次の問いに答えよ。
 - ① 発生するXとYのグラフの形状が異なっている理由を述べよ。
 - ② Aの時点で光照射を止めた場合、XとYの発生はどうなるか答えよ。

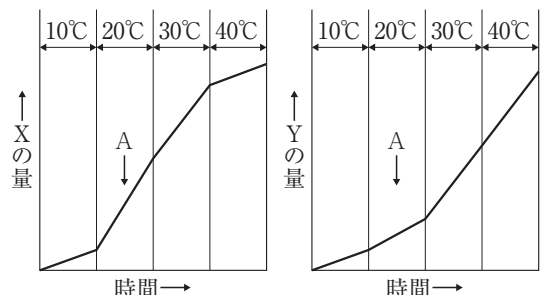


図2

③ 〈気孔開閉と光合成速度〉

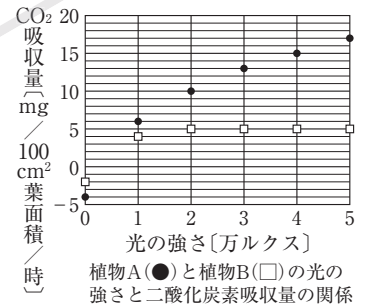
気孔は、一對の向かい合った〔ア〕にはさまれた隙間で、陸上の植物では葉の裏面に多い。一般に、気孔は光合成が盛んに行われる晴天時の昼間に開いて、夜間に閉じる。気孔からの〔イ〕には、根からの養分の取り込みを促進し、葉から熱を逃がして日中の葉の温度の上昇を防ぐ役割がある。また、気孔から光合成に必要な二酸化炭素を取り込む。気孔は、〔ア〕の間のできる隙間の大きさを変えることによって、これらの働きを調節している。気孔の開閉は主に植物ホルモンにより調節されており、植物体内の〔ウ〕が不足するとアブシシン酸が合成される。乾燥地の植物では日中の気温が高いため、昼間に気孔を開くと〔イ〕によって〔ウ〕が失われる。(あ)ベンケイソウ科の中には、これを防ぐため夜間に気孔を開いて二酸化炭素を取り込む種類が知られている。

植物の個体の中で、(い)光のよくあたる位置につく葉は陽葉、日陰の位置につく葉は陰葉とよばれる。陽葉では〔エ〕組織が発達し、陰葉では散乱された光を利用するため葉面積が広い。このように個々の葉の構造には、葉のつく位置による違いがみられるが、いずれの葉でも、植物が取り込んだ二酸化炭素は葉緑体での光合成に使われる。葉緑体には、平たい袋状の構造の〔オ〕があり、これらが積み重なってグラナという構造をつくっている。〔オ〕には光合成色素があり、光エネルギーを吸収する反応を行う。〔オ〕をとりまく液体部分を〔カ〕という。光合成色素の吸収スペクトルと光合成の作用スペクトルは形が似ていることが知られており、主に赤色と〔キ〕色の光が光合成に利用されている。植物は光のエネルギーによってつくられたATPを使って二酸化炭素を有機物に変えている。植物にはこのような光合成を行う同化器官と、これを支える茎や根などの非同化器官がある。

- (1) 〔ア〕～〔キ〕にあてはまる語句を答えよ。
- (2) 下線部あのような植物の総称を答えよ。
- (3) 下線部いのような陽葉と陰葉を比べたときの光-光合成曲線の特徴について、(a)～(c)の値についてどちらの葉の値が大きいか述べよ。

(a) 光補償点 (b) 光飽和点 (c) 最大光合成速度

- (4) 植物Aと植物Bにおける光の強さと二酸化炭素吸収量の関係を測定したところ、右図のような結果が得られた。①～④について答えよ。



- ① 光の強さが4万ルクスのときの植物Aの光合成速度は、植物Bの光合成速度の何倍か答えよ。
- ② 3万ルクスの光を一定時間照射した場合、植物Aと植物Bの葉のグルコースの増加量が同じになるためには、植物Bは、植物Aの何倍の葉面積が必要か答えよ。なお、転流については考えないものとする。
- ③ 葉面積10cm²の植物Aに2万ルクスの光を20時間照射し、その後、一定時間暗所に置いたところ、葉面積10cm²の植物Bに2万ルクスの光を12時間照射した場合のグルコースの増加量と同じとなった。暗所に置いた時間を答えよ。なお、転流については考えないものとする。
- ④ 植物Bの植物個体の鉢植えを図におけるCO₂吸収量が0となる光の強さで、長時間育成させたところ、枯死した。その理由を述べよ。なお、光条件以外は最適な条件にあるものとし、すべての葉に同じ強さの光が照射されているものとする。