理　　科

〈監督者の指示があるまで開いてはいけない〉

1. 出願時に選択した２科目について，解答を別紙の解答用紙に記入しなさい。
2. 選択していない科目の解答用紙は問題配布後に回収します。
3. 試験開始後，まず解答用紙に自分の受験番号と氏名を正しく記入しなさい。
4. 試験開始後，速やかに問題冊子に落丁や乱丁がないか確認しなさい。
   落丁や乱丁があった場合は，手を挙げなさい。
5. 下書きや計算は問題冊子の余白を利用しなさい。
6. 問題冊子は試験終了後，持ち帰ってもよい。
   ただし，試験途中には持ち出してはいけない。

問　題　目　次

物　理	1	～	6	ページ
化　学	7	～	17	ページ
生　物	18	～	31	ページ

生　　物

1. 呼吸と発酵に関する各問いに答えよ。

Ⅰ．多くの生物は酸素を用いて有機物を分解し，その際に放出された化学エネルギーを使ってADP（アデノシン二リン酸）からATP（アデノシン三リン酸）を合成している。この過程を呼吸とよぶ。呼吸は解糖系，クエン酸回路，電子伝達系よりなる。解糖系は細胞質基質の酵素群がはたらいて段階的に進む反応経路であり，有機リン酸化合物を経てピルビン酸（$C_3H_4O_3$）が合成される。グルコース（$C_6H_{12}O_6$）を基質とした解糖系の反応全体は反応1の式で表される。反応2は解糖系の反応の一部である。反応2を触媒するホスホフルクトキナーゼは酵素の活性部位とは異なる部位にADPやAMP（アデノシン一リン酸）が結合すると活性型の立体構造になり，ATPが結合すると異なる立体構造に変化して不活性型になる。①

反応1

グルコース＋2ADP＋2H_3PO_4（リン酸）＋2NAD^+

→ 2$C_3H_4O_3$（ピルビン酸）＋2ATP＋2NADH＋2H^+＋2H_2O

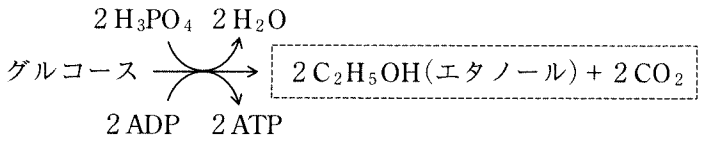
反応2（触媒酵素：ホスホフルクトキナーゼ）

フルクトース6-リン酸＋ATP → フルクトース1,6-ビスリン酸＋ADP＋H^+

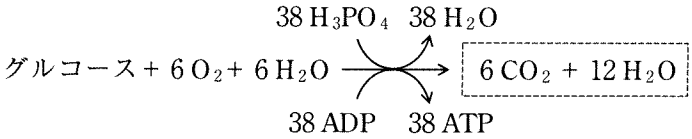
一方，微生物の中には酸素を使わずに有機物を分解してエネルギーを得るものもいる。このエネルギー産生の過程を発酵とよぶ。酵母により行われるアルコール発酵は，グルコースを基質に用いた場合は反応3の式で表される。この反応でグルコースから2分子のピルビン酸が合成されるまでの過程は反応1と同じである。アルコール発酵では，ピルビン酸はピルビン酸脱炭酸酵素のはたらきにより二酸化炭素とアセトアルデヒド（CH_3CHO）に分解され，アセトアルデヒドはアルコール脱水素酵素のはたらきでエタノール（C_2H_5OH）になる。

呼吸では燃焼によるグルコースの完全酸化と似た反応が行われ，グルコースのもつ化学エネルギーをATPの化学エネルギーや熱エネルギーなどとして取り出すが，アルコール発酵では，グルコースから呼吸で取り出せるエネルギーの10％以下のエネルギーしか取り出せない。②反応4に呼吸の反応をしめす。呼吸でのATP産生量は最大でしめしている。

反応 3



反応 4



問 1. 下線部①のように，活性部位以外に特定の分子が結合すると構造が変化して活性が変わる酵素を何というか，答えよ。

問 2. ホスホフルクトキナーゼは ATP を基質に用いているが，その一方で ADP より ATP が多量に存在すると酵素活性は低下する。ATP による酵素活性の抑制の生物学的意義を呼吸反応全体から考察せよ。

問 3. 下線部②の理由を，反応 3 と反応 4 の破線で囲ってある反応生成物に着目して説明せよ。

問 4. 以下の文章で，ア～カの [　　] に入る適切な語句を答えよ。使用する語句は重複しない。

酵母をすりつぶして得たしぼり汁(酵母抽出液)にグルコースを加えるとアルコール発酵が行われる。しかし，基質のグルコースが十分に存在しても，酵母抽出液のアルコール発酵は長くは持続せず，停止する。

この停止した状態に煮沸した酵母抽出液を添加するとアルコール発酵が再活性化された。しかし，等量の水をかわりに添加しても再活性化されなかった。このことから，酵母抽出液には，発酵の持続に必要だがグルコースと同様に発酵で枯渇してしまう物質が含まれていると考えられた。

その物質が何かを次のように考察した。添加した酵母抽出液は煮沸されていることから，[ア] の枯渇が補われて活性化したことは否定できた。[イ] は途中の反応で基質として使われるが，反応が最後まで進めば余剰に産生されるので枯渇しないと考えられた。補酵素としてもはたらく [ウ] は [エ] に変換されるが，[エ] はアルコール発酵において [オ] を還元して [カ] を生成する際に使われて [ウ] に再生される。このため，[ウ] も枯渇しないと考えられた。これらの考察をふまえてさまざまな実験を行った結果，発酵の再活性化を引き起こす物質はリン酸であることがわかった。

Ⅱ．酵母のアルコール発酵はアルコール飲料の生産に利用される。アルコール飲料として体内に摂取されたエタノールは主に小腸で吸収され，肝臓に運ばれて分解される。エタノールはアルコール脱水素酵素により分解され，アセトアルデヒドを生じる。アセトアルデヒドは酒酔いの症状を引き起こす原因物質で，２型アルデヒド脱水素酵素(ALDH２)により無毒の酢酸へと分解される。ALDH２の遺伝子には正常型遺伝子 *n* と変異型遺伝子 *d* が存在する。遺伝子 *n* と遺伝子 *d* は対立遺伝子である。遺伝子 *n* からはタンパク質Ｎが，遺伝子 *d* からはタンパク質Ｄが翻訳される。*nn* の遺伝子型ではALDH２が十分にはたらき，アルコールに強い体質(「強い人」)になり，*dd* の遺伝子型ではALDH２がまったくはたらかず，アルコールにきわめて弱い体質(「きわめて弱い人」)になる。*nd* の遺伝子型ではALDH２のはたらきが不完全で，アルコールに弱い体質(「弱い人」)になる。

問 5. 遺伝子 *n* と遺伝子 *d* の遺伝子頻度をそれぞれｐとｑとし，ｐ＋ｑ＝１であるとする。ハーディ・ワインベルグの法則が成り立つ20,000人の集団で，遺伝子 *n* の遺伝子頻度が0.6だった場合，「強い人」，「弱い人」，「きわめて弱い人」の人数はそれぞれ何人になるか。「強い人」の人数を解答欄のアに，「弱い人」の人数をイに，「きわめて弱い人」の人数をウに答えよ。

問 6. 次の文章のア～オの［　　］に入る数字を答えよ。解答が小数の場合は小数第二位を四捨五入せよ。

ALDH 2は二つのタンパク質が二量体を形成し，さらにその二量体タンパク質同士がペアを作って四量体となって酵素として機能する。四量体中の各タンパク質は固有の四ヵ所の位置に配置され，入れかわることはない。「弱い人」では，四量体のそれぞれの位置に，タンパク質Nかタンパク質Dのどちらかが入るため，四量体の種類は全部で［ア］通りになる。それらのうち，「強い人」のもつ四量体と同じ組み合わせになるのは［イ］通りで，「きわめて弱い人」のもつ四量体と同じ組み合わせになるのは［ウ］通りである。

このALDH 2の酵素活性では二量体タンパク質のパートナーの組み合わせが重要になる。タンパク質NとタンパクDがパートナーを形成する二量体は，タンパク質Dがタンパク質Nの機能を阻害してしまうため，ALDH 2の酵素活性に対してタンパク質Dのみで形成された不活性型二量体(DD)と同様に作用する。すべてがタンパク質Nからなる四量体の酵素活性を100％，すべてがタンパク質Dからなる四量体の酵素活性を0％としたとき，一つまたは二つともタンパク質Dである二量体が活性型二量体(NN)とペアを組んで四量体を形成した場合の酵素活性は，阻害的な作用により25％となる。したがって，「弱い人」で酵素活性が25％になる四量体の組み合わせは，全部で［エ］通りである。以上から，「弱い人」がもつ総ALDH 2酵素活性は，「強い人」の酵素活性の［オ］％になる。

なお，タンパク質NとタンパクDは細胞内で等しく発現しており，さらに，四量体へはランダムに取り込まれるものとする。

2. 神経に関する各問いに答えよ。

Ⅰ．脊椎動物の神経系のうち，脳と脊髄をまとめて中枢神経系という。これに対して，体の各部と中枢神経系をつなぐ神経系を末梢神経系という。末梢神経系に含まれる神経系はさらに，感覚神経，運動神経を含む［ア］神経系と，①交感神経，副交感神経を含む［イ］神経系に分けられる。

末梢神経系に属する神経細胞の軸索は，脊髄に二つの束となって出入りしている。このうち，［ウ］根には運動神経などが通っており，［エ］根には感覚神経が通っている。大脳からの興奮が骨格筋におくられるとき，興奮は脊髄から運動神経を通じて伝えられる。

感覚神経のなかには，脊髄を通らずに脳に入るものがあることが知られている。光の受容器である［オ］細胞で生じた神経情報や鼻腔の奥に存在する匂い物質の受容器である［カ］細胞で生じた神経情報は脳に直接伝えられる。

問 1. ア～カの［　　］に入る適切な語句を答えよ。

問 2. 下線部①について，以下のａ～ｆのなかで交感神経が優位にはたらくことによって生じる現象をすべて選び，記号で答えよ。

ａ．瞳孔が拡大する

ｂ．血圧が上昇する

ｃ．気管支が収縮する

ｄ．排尿が促進される

ｅ．心拍数が増加する

ｆ．胃の動き(ぜん動)が促進される

Ⅱ．運動神経について調べるために，以下に述べるようにカエルから神経筋標本を作製し，実験に用いた。

カエルを苦痛のないよう安楽死させたあと，図１にしめすように，腰のあたりの脊髄から出ている神経軸索の太い束(神経束)を②Ｂ点で木綿糸を使ってしっかりとしばってからＡ点で切断した。そのあと，図２のように，神経束がふくらはぎの筋肉につながっている状態でカエルから取り出した。これを神経筋標本とよぶ。

つぎに，以下の測定１と２を行った。

測定１：

図２でしめすように，神経束を電極Ｃ，Ｄ，Ｅ，Ｆ，Ｇの上にのせ，各電極間の電位測定や，電極による電気刺激ができるようにした。つぎに，電極Ｄで神経束に興奮(活動電位)が生じるような瞬間的な電気刺激を与えた。その結果，電極Ｇの電位を基準とした場合の電極Ｅでの電位の時間変化が図３の線１のように記録された。また，電極Ｇの電位を基準とした場合の電極Ｆでの電位の時間変化は図３の線２のように記録された。また，電気刺激によってふくらはぎの筋肉が収縮した。

測定２：

測定１のあと，電極ＦとＧの中間点で神経束を木綿糸で新たにしばった。つぎに，測定１と同様の電気刺激を与えた。その結果，電極Ｇの電位を基準とした場合の電極Ｅでの電位の時間変化が図３の線３のように記録された。今回は，電気刺激後にふくらはぎの筋肉は収縮しなかった。

問 3. 下線部②の手順について，実験をする際に間違え，Ａ点でしばってＢ点で切断してから神経筋標本を作製した。この標本を使って，測定１と同様に，電極Ｄで電気刺激を与え，電極Ｇの電位を基準とした場合の電極Ｅでの電位の時間変化を測定したところ，測定結果は図３の線４のようになった。この結果になった理由を以下の語句を使って記述せよ。

語句：細胞膜，イオン，活動電位

問 4. 測定２でふくらはぎの筋肉が収縮しなかった理由を述べよ。

問 5. 実験に用いた神経束を興奮が伝導する速度(m/秒)を答えよ。なお，解答が小数を含む場合は小数第一位を四捨五入せよ。

問 6. 測定１が終わったあと，測定２を始める前に電極Ｅで活動電位が生じるような電気刺激を行ったとすると，電極Ｄの電位を基準とした場合の電極Ｃでの電位の時間変化はどのようになると考えられるか，解答欄のグラフ上に記入せよ。なお，解答欄のグラフには参考として図３の線１を破線でしめしてある。

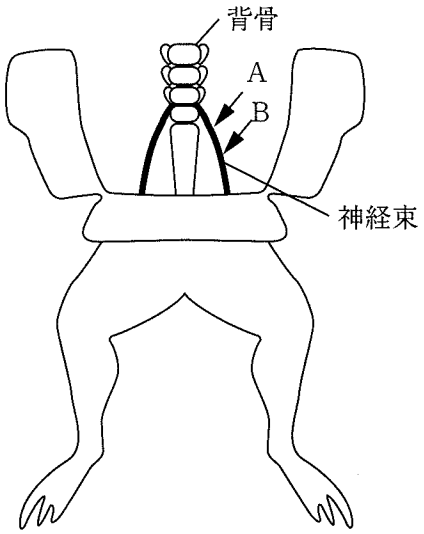

背骨
A
B
神経束

図1

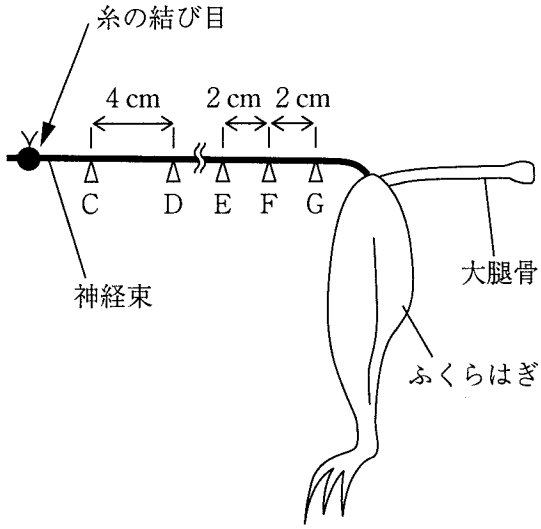

糸の結び目
4 cm
2 cm
2 cm
C
D
E
F
G
神経束
大腿骨
ふくらはぎ

図2

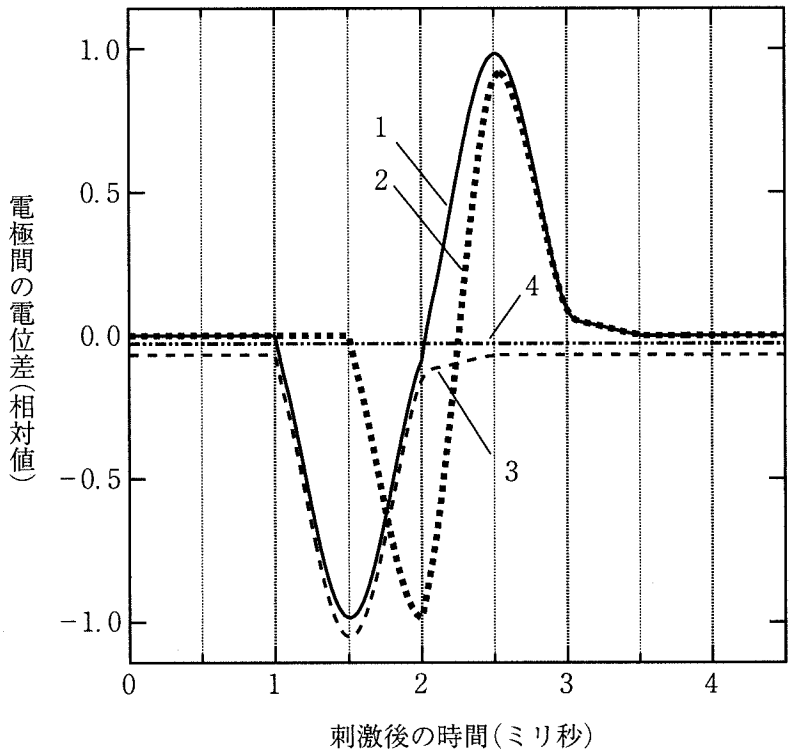

1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
0
1
2
3
4
1
2
3
4
電極間の電位差(相対値)
刺激後の時間(ミリ秒)

図3

3. 細胞死に関する各問いに答えよ。

Ⅰ．多細胞生物の形態形成では，決められた時期に決められた細胞が死んで失われていく。この自発的な細胞死は「プログラム細胞死」とよばれている。例えば，脊椎動物の四肢は胴部に生じた肢芽とよばれる突起が発達して形成され，四肢の先端にある指は指間領域(指と指の間の領域)の細胞がプログラム細胞死によって除去されることにより形成される。指間領域でのプログラム細胞死の機構を知るために次の実験１～４を行った。

実験１：ニワトリの胚を適温に保ち発生させる(以下，孵卵(ふらん)という)と，孵卵を開始して$7\frac{1}{3}$日(７日と８時間)目から後肢形成中の指間領域で細胞死が起こりはじめた。この際，肢芽の表皮につつまれた中胚葉由来の組織(間充織)の細胞が細胞死によって消失する。

実験２：孵卵開始$6\frac{0}{3}$日目に指間領域として予定されている部分の表皮を除去してニワトリの胚の孵卵を続けると，その下の間充織細胞は細胞死を起こさなかった。

実験３：孵卵開始$6\frac{0}{3}$日目～$6\frac{1}{3}$日目に指間領域として予定されている間充織を切り出して培養したところ，細胞死は起こらなかった。一方，孵卵開始$6\frac{2}{3}$日目～$7\frac{1}{3}$日目に同様に間充織を切り出して培養すると，孵卵開始$7\frac{1}{3}$日目から細胞死が起こりはじめた。

実験４：孵卵開始$6\frac{0}{3}$日目から$7\frac{1}{3}$日目の間を$\frac{1}{3}$日(８時間)ずつに区切り，いずれかの期間で薬品Ａ(注)を細胞の増殖に影響が出ない濃度で作用させた。その結果，孵卵開始$6\frac{1}{3}$日目～$6\frac{2}{3}$日目の期間に作用させた場合のみ，細胞死が顕著に抑制され，他の期間に作用させた場合は細胞死が抑制されることはなかった。

(注)薬品Ａは，チミジン(チミンとデオキシリボースからなる)と構造が類似するため，DNAに取り込まれると，その後の転写パターンが変化する。この薬品は発生の特定の時期にのみ効かせることができる。

問 1. 次のア～オのうち中胚葉由来の器官をすべて選び，記号で答えよ。

ア．肺

イ．網膜

ウ．腎臓

エ．心臓

オ．骨格筋

問 2. 実験1と実験2から，肢芽の指間領域のプログラム細胞死に関してわかることを述べよ。

問 3. 実験3と実験4から，次の文章のアとイの［　　］に入る適切な数字を答えよ。

「指間領域において細胞死する予定の細胞は，細胞死開始時を基準にすると［ア］時間前～［イ］時間前の間にDNA複製を行っていると考えられる。」

なお，解答は順不同とする。

問 4. 実験3と実験4から，指間領域の細胞死の機構について，どのようなことが考えられるか，述べよ。

問 5. アヒルの後肢では，ニワトリの後肢に比べて，指間のプログラム細胞死があまり起こらないことがわかっている。アヒルとニワトリで細胞死の程度が違うことについて両者の生活様式と関連させて考察せよ。

問 6. 細胞死にはアポトーシスや壊死(ネクローシス)などが知られている。アポトーシスはプログラム細胞死で多く見られ，細胞の外からの傷害により死に至るネクローシスと比べると周辺の細胞に損傷を与えにくい。損傷を与えにくい理由を，アポトーシスの仕組みにもとづいて答えよ。

Ⅱ．植物の生活環においても多くの段階でプログラム細胞死が機能している。樹木では葉の老化がある程度進むと，葉柄の付け根に［　A　］とよばれる特別な細胞層が形成され落葉する。落葉は［　A　］の細胞壁が酵素によって分解されることで起こり，この過程は植物ホルモンである［　B　］によって促進され，［　C　］によって抑制される。

問 7. A～Cの［　　］に入る適切な語句を答えよ。

問 8. 植物で起こるプログラム細胞死の例を落葉・落果以外に一つあげよ。

問 9. 夏緑樹や照葉樹は定期的に葉をつけかえているが，種によって落葉の時期や葉の構造は異なる。

① 日本の照葉樹林に関する次の記述のうち適切なものを二つ選び，記号で答えよ。

ア．ブナが分布する。

イ．冷温帯に分布する。

ウ．ハイマツが分布する。

エ．スダジイが分布する。

オ．クチクラ層の厚い葉をつける。

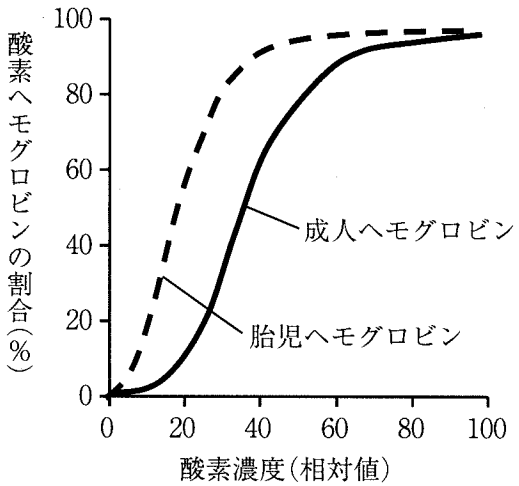
② 夏緑樹は照葉樹と異なり秋から冬に落葉し，春に葉をつけかえる。このような生活形が夏緑樹に有利である理由を答えよ。

4. 体液に関する各問いに答えよ。

Ⅰ．脊椎動物の体液は血管内を流れる血液，細胞間に存在する［ア］，およびリンパ管内を流れるリンパ液に分けられる。血液は細胞成分である血球と液体成分である［イ］とからなる。［ア］，［イ］，リンパ液は細胞外液とよばれ，細胞内の液体(細胞内液)とイオン組成が異なる①。水，酸素や二酸化炭素などは毛細血管の壁を通過するが，［イ］に最も多く存在するタンパク質である②［ウ］は毛細血管から［ア］へ移行しにくい。

血液の血球成分の一つである赤血球は，成人の場合，［エ］に存在する造血幹細胞から作られる。造血が完了して血管内に出現する成熟した赤血球には核がなく扁平な形をしている③。ヒトの赤血球の寿命は約［オ］日とほぼ決まっており，古くなった赤血球は［カ］や肝臓で壊される。

赤血球は多量のヘモグロビンを含み酸素の運搬を行う。肺胞に分布する毛細血管では，酸素濃度が高く二酸化炭素濃度が低いため，ヘモグロビンのほとんどが酸素と結合して酸素ヘモグロビンとなる。一方，組織の毛細血管では，酸素濃度が低く二酸化炭素濃度が高くなるため，酸素ヘモグロビンは酸素を解離して酸素非結合型ヘモグロビンに戻る。全ヘモグロビンに対する酸素ヘモグロビンの割合と，酸素濃度との関係をしめした曲線を酸素解離曲線という。図に，同じ二酸化炭素濃度下で測定した成人ヘモグロビンと胎児ヘモグロビンの酸素解離曲線をしめす。成人ヘモグロビンと胎児ヘモグロビンは構造が異なるため，異なる曲線を描く。図において，健康な成人が肺で酸素を受け取った時の血液の酸素濃度を 100 とする。また，ここでは，胎盤における母体の血液と胎児の血液間の酸素の拡散は十分に速く，胎盤での母体の血液と胎児の血液の酸素濃度は約 30 であるとする。



図

問 1. ア～カの [　　] に入る適切な語句を答えよ。

問 2. 下線部①について，細胞外液と比べてより高い濃度で細胞内液に含まれる陽イオンは何か。一つ答えよ。

問 3. [ウ] は血液の水分の保持に重要な機能を担っている。それはどのような仕組みによるのか，下線部②の性質から答えよ。

問 4. 下線部③の赤血球の形状から得られる機能上の利点を二つあげよ。

問 5. 胎児は胎盤を介して母体から酸素を受け取る。成人ヘモグロビンと胎児ヘモグロビンの構造が異なることは胎児が胎盤において母体から酸素を受け取る際に利点となる。どのような利点か，図にもとづいて述べよ。

Ⅱ. 2020 年春より拡大した新型コロナウイルス感染症(COVID-19 感染症)では，肺が傷害を受け，その結果，肺で血液中に酸素を取り込めず，血液の酸素濃度が低下して生命が脅かされることがあった。そのため，自宅療養中に肺の病状が進行し④肺で取り込む酸素量が低下した患者を見つけだす目的で，パルスオキシメーター(光学式血中酸素飽和度計)という医療機器が用いられた。パルスオキシメーターは，動脈血の全ヘモグロビンに対する酸素ヘモグロビンの割合を，皮膚の上から測定する機器である。

問 6. 下線部④の目的でパルスオキシメーターが使われたが，肺の傷害による血液の酸素濃度の低下を初期段階でとらえにくい点が指摘されている。図を参考にその理由を述べよ。