

演習問題略解

★0章

- 【0.1】 食品中の有機物が微生物により分解されることに変わらないが、発酵と腐敗の違いは、乳酸菌や納豆菌、麹菌などによる発酵がヒトに有益であるのに対し、腐敗はヒトに不利益であること。
- 【0.2】 日本酒はお米由来のデンプンの麹菌による糖化と、糖化により生じたグルコースの酵母によるアルコール発酵が同時並行的に進む。ワインではグルコースとフルクトースを含んだブドウ果汁から酵母によるアルコール発酵のみが行われる。日本酒のアルコール発酵形式を並行副発酵という。
- 【0.3】 (a) リパーゼ：油汚れ。脂質の加水分解。
(b) プロテアーゼ：タンパク質の汚れ。タンパク質の加水分解。
(c) アミラーゼ：デンプンの汚れ。デンプンの加水分解。
- 【0.4】 化学合成で作る低分子の医薬品に対し、遺伝子工学などのバイオテクノロジーによって動物細胞や微生物により生産される高分子のタンパク質の医薬品を言う。代表的なバイオ医薬は抗体であり、標的である抗原に特異的に結合する、たとえば、癌細胞にのみ作用するため、従来の医薬品に比べ副作用が少ない。
- 【0.5】 バイオエタノールはバイオマスを原料として発酵により製造されたエタノールを言う。石油の様な枯渇資源を代替する非枯渇資源からのエネルギー生産となるが、トウモロコシや砂糖キビなどの可食資源から製造する場合は、食糧との競合といった問題点がある。リグノセルロースの非可食部位からの生産技術の開発が望まれる。

★1章

- 【1.1】 大腸菌：真正細菌
納豆菌：真正細菌
アルコール酵母：真核生物
メタン生成菌：古細菌
- 【1.2】 独立栄養生物のエネルギー源：無機物ないし光
独立栄養生物の炭素源：二酸化炭素

- 【1.3】 真正細菌と真核生物：真正細菌には酸素発生型光合成を行うシアノバクテリアと酸素非発生型光合成を行うその他の光合成細菌が含まれる。真核生物にはシアノバクテリアから進化した光合成生物である植物と藻類が含まれ、いずれも酸素発生型光合成を行う。
- 【1.4】 遺伝子工学的手法の根幹をなす DNA 増幅法である PCR に用いられる DNA ポリメラーゼ (*Tac* ポリメラーゼ) は、75°C 以上の高温で生育する *Thermus aquaticus* という好熱菌 (真正細菌) 由来である。また、洗濯用洗剤に配合されているタンパク質分解酵素はアルカリ性 (pH10-11) で高い活性を示すが、この酵素は好アルカリ性細菌 (主として *Bacillus* 属) によって分泌される。
- 【1.5】 リゾチームは細菌細胞壁の構成成分であるペプチドグリカンの多糖部分を選択的に切断する加水分解酵素である。ペプチドグリカンが分解されると細胞壁の強度が低下し細菌細胞の生存に支障をきたす。グラム陽性細菌の細胞壁にはリゾチームの基質となるペプチドグリカンが多量に含まれるので、リゾチームによる影響を強く受ける。一方、グラム陰性細菌のペプチドグリカン含量は低いうえにペプチドグリカン層が外膜に覆われているため、リゾチームの影響は相対的に低いといえる。
- 【1.6】 mRNA の塩基配列をアミノ酸配列に翻訳したタンパク質を合成する場がリボソームであり、リボソームは種々のタンパク質と RNA からなる顆粒である。リボソームは真核原核を問わずすべての生物に必ず存在しており、生物を網羅的に比較するのに適した分類指標である。リボソーマル RNA 遺伝子はリボソームを構成する RNA の塩基配列をコードする遺伝子であり、真核生物の場合には 16S リボソーマル RNA 遺伝子が、真核生物の場合には 18S リボソーマル RNA 遺伝子が系統分類によく用いられる。これらの遺伝子には極めて保存性の高い領域が点在しており、その間に生物種特有の塩基配列が存在している。しかも塩基数もそれぞれ一定の範囲に収まっている。保存性の高い領域があるため増幅が容易で、種特有の塩基配列が含まれ、しかも塩基数がほぼ同じなので信頼性の高い系統解析が可能である。したがって、16S リボソーマル RNA 遺伝子や 18S リボソーマル RNA 遺伝子は系統分類に有用な遺伝子である。
- 【1.7】 系統樹 (図 1.4) によれば、枯草菌と乳酸菌は同じ分岐群 (クレード) に収容されているが、放線菌は異なったクレードを形成している。したがって、系統分類学的に枯草菌は放線菌よりも乳酸菌に近縁といえる。
- 【1.8】 加熱できない液体培地を無菌状態とするにはろ過によって物理的に微生物を取り

除くべきである。ただし、ろ過に用いるフィルターユニットやろ液（除菌後の液体培地）を入れる容器は加熱処理等によってあらかじめ滅菌しておく必要があるし、ろ過の操作も無菌的空間で行う必要がある。

★2章

【2.1】 アミノ酸とはアミノ基とカルボキシ基を有する有機化合物である。タンパク質の構成要素である α -アミノ酸では、カルボキシ基が分子の末端に位置するとともに、カルボキシ基が結合している炭素（ α 炭素）にアミノ基も結合している。不斉炭素のないグリシンを除き、タンパク質に含まれる α -アミノ酸はすべてL体である。環状構造を持つプロリンは環化によってアミノ基がイミノ基にかわっているので厳密にはイミノ酸だが、便宜上アミノ酸として扱う場合が多い。

【2.2】 酵素は正しい立体構造を形成している場合に活性を発揮する。立体構造は水素結合、静電的相互作用、疎水性相互作用、ジスルフィド結合によってもたらされる。これらの相互作用は可逆的だが、限度を超えて加熱された場合には不可逆的な立体構造変化をきたしてしまう。このような変化をきたした酵素は本来の立体構造を失って失活する。

【2.3】 グルコースは α アノマー、フルクトースは β アノマーとして互いのアノマー位で結合している。したがって、スクロースには還元力がない。

【2.4】 グルコースからは解糖系において2分子のピルビン酸、2分子のATP、2分子のNADHが生じる。1分子のピルビン酸からは1分子のNADHを生じつつ脱炭酸を伴って1分子のアセチルCoAが生じる。1分子のアセチルCoAからはTCA（クエン酸）回路を介して10分子のATPが得られる。また、電子伝達系では1分子のNADHから2.5分子のATPが生じ、1分子のFADH₂からは1.5分子のATPが生じる。したがって、1分子のグルコースからは32分子のATPが生じることとなる。グルコースの分子量は180なので、デンプン1gからは約0.18分子のATPが得られる。

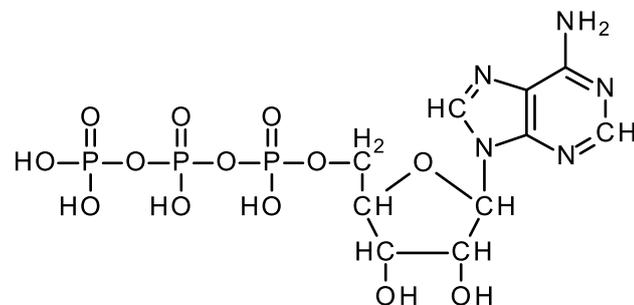
オリーブ油はトリアシルグリセロールで脂肪酸とグリセリンかならなる。そして、トリアシルグリセロールの主成分は脂肪酸なのでエネルギー源としては脂肪酸が支配的とみなせる。また、オリーブ油を構成する脂肪酸の約80%はオレイン酸（炭素数18で不飽和結合が一つ存在）で約10%がパルミチン酸（炭素数16の飽和脂肪酸）ある。計算を容易にするため、パルミチン酸の分解を考えてみる。1分子のパルミチン酸は1分子のATPの消費を伴ってパルミトイルCoAに変換される。パルミトイルCoAは7回の β 酸化を受けて8分子のアセチルCoAを生じる。また、 β 酸化では一回ごとにNADHとFADH₂が1分子ずつ生じる。すなわち、1分子のパルミチン酸からは8分子のアセチルCoAに加えて7分子のNADHとFADH₂

が生じ、最初に消費した ATP を考慮すると、106 分子の ATP が得られることになる。パルミチン酸の分子量は 256 なので、1 g からは約 0.41 分子の ATP が獲得できることになる。

したがって、単位重量当たりのエネルギー (ATP) 発生量では糖質 (約 0.18 ATP/1 g) より脂質 (約 0.41 ATP/1 g) のほうが優れていると言える。なお栄養学的には、糖質と脂質からはそれぞれ 1 g あたり約 4kcal と 9kcal のエネルギーが得られるとされており、この比は上記の概算値とほぼ一致している。)

【2.5】 蛇毒がリン脂質に作用して親水性部分が除かれるとジアシルグリセロールが生じる。ジアシルグリセロールの親水性は非常に低いので脂質二重層を形成し得ない。したがって、蛇毒は細胞膜の破壊によって細胞の崩壊をもたらす。

【2.6】



【2.7】 G-C 塩基対における水素結合は 3 か所だが A-T 塩基対では 2 か所である。つまり G-C 塩基対のほうが安定な塩基対であり、GC 含量が高いほど熱に対して安定な DNA と考えられる。

【2.8】 脂質、糖質およびタンパク質から得られるエネルギーは 1 g あたり、それぞれ約 9kcal, 4kcal, 4kcal とされているので、この点からすればタンパク質はエネルギー源として糖質と同等といえる。しかし、タンパク質は形態形成、酵素、調節、情報伝達などの様々な生命現象における重要な役割を担っており、その度合いは脂質や糖質に比べて高いと言える。したがって、タンパク質は主たるエネルギー源としてはあまり適していないと考えられる。なお、三大栄養素のエネルギー比率の目安は、タンパク質 : 脂質 : 糖質 = 13~20% : 20~30% : 50~65% とされている。

【2.9】 酸素が不足した状況下では発酵や嫌気呼吸といったエネルギー代謝を行う従属栄養性微生物が有機物を利用する。このうち発酵としてはアルコール発酵、プロピオン酸発酵、酪酸発酵、アセトン・ブタノール発酵などがあり、いずれからも揮

発性有機物（エタノール、プロピオン酸、酢酸、アセトン、ブタノールなど）が産物として生じる。したがって、有機物に富んだ嫌気環境下では揮発性有機物が発生しやすいと考えられる。

- 【2.10】酸素発生型光合成の電子供与体はほぼ枯渇することのない水であり、電子受容体も枯渇の心配のない二酸化炭素である。また、当然ながら独立栄養なので栄養塩類をはじめとする無機物さえ調達できれば基本的に生育が可能である。酸素発生型の原核光合成生物であるシアノバクテリアの場合には空気中の窒素をアンモニアに変換（窒素固定）することも可能なので貧栄養でも生育できる。シアノバクテリアは概して乾燥に強いのも特徴である。植物でもマメ科植物などは根に共生している根粒菌（*Rhizobium* 属が代表的）が窒素固定を担うので窒素源の少ない痩せた土地でも旺盛に生育することができる。このように、地表の大半において生存に必要な要件がすべて満たされることから、酸素発生型の光合成を行う生物は地表に蔓延していると考えられる。

★3章

【3.1】

- DNA を一本鎖に（変性、極性）させるには（37℃、72℃、95℃）の温度で処理をすればよい。
- PCR に使う酵素は（DNA アミラーゼ、DNA トランスクリプターゼ、DNA ポリメラーゼ、DNA リパーゼ）である。
- DNA を電気泳動分析した結果を写真に撮ると DNA の長さが短いほど（上、下）に検出された。
- DNA の遺伝子配列では、G と相補的に（A、T、G、C）が結合している。
- タンパク質の設計図となる DNA の遺伝子配列は（1、2、3）個の遺伝子の組合せが一つの（脂肪、アミノ酸、塩基）に対応している。
- PCR 反応は、（プロモーター、プライマー、オペレーター）のテンプレートへの（カバリング、アニーリング、ダブリング）により開始される。

【3.2】 インターネットを活用し、以下のステップを進める。

- NCBI nucleotide database サイトで pNC500 を検索
- *Rhodococcus rhodochrous* plasmid pNC500 DNA を選択
- FASTA データを選択し、塩基配列をコピー
- ORF finder サイト
- Enter Query Sequence に上記コピーした配列を貼り付け 'submit' をクリック
- 得られた ORF データを選択し、BLAST ボタンをクリックして機能を解析する。

【3.3】 ハイブリッド形成（ハイブリダイゼーション）とは、1本鎖のDNA同士が相補鎖配列部分で結合し2本鎖を形成することであり、この原理を用いて目的遺伝子を検出する。

- ・ゲノムDNAを制限酵素で切断し、ベクターにライゲーション、大腸菌などに形質転換することで様々なDNA断片が挿入されたベクターの混合物（ゲノムライブラリーと呼ぶ）を作成する。
- ・ゲノムライブラリーを含む大腸菌コロニーをナイロン膜などに写し取り、DNAを膜に固定させる（ブロットイング）。
- ・ブロットイングされたDNAを目的遺伝子の配列を有する短いDNA断片（プローブ）を混合し、ハイブリッド形成させる。
- ・プローブにはあらかじめ検出のための標識分子を結合させておき、ハイブリッド形成した2本鎖DNAを検出する。

【3.4】 制限酵素で切断されたプラスミドベクターに外来DNAが挿入されずにプラスミドが閉環してしまう現象（self ligation）を防ぐための例として以下の方法が考えられる。

- 1) プラスミドを2つの異なる粘着末端を形成する制限酵素で切断し、同様の制限酵素切断末端を有する外来DNAをクローニングする。
- 2) プラスミドを制限酵素処理後、アルカリフォスファターゼ処理した後、末端にリン酸基を有する外来DNAとライゲーション反応を行う。

★4章

【4.1】 4.1節および4.2節参照。モノづくりの実際に関する個別の事例を示し、具体的に論じても良い。

【4.2】 図4.1（工程の全体像）および4.2節（各工程の詳細）参照。

【4.3】 4.2.3項および4.2.4項参照。

【4.4】 4.2.3項参照。前問と同様に、基本的な用語を簡潔に説明できるようにしておくことが重要である。

★5章

【5.1】 圧力を P 、体積を V 、物質量を n 、絶対温度を T とすると、理想気体の状態方程式より、

$$R = PV / nT$$

と書ける。

標準状態(0°C, 1 atm)における 1 mol の理想気体の体積は 22.4 L であるから、

$$R=1 \text{ atm} \times 22.4 \text{ L}/(1 \text{ mol} \times 273.15 \text{ K}) = 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

となる。

SI 単位に換算すると、 $22.4 \text{ L} = 2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 、 $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ より、

$$R = 101325 \text{ Pa} \times 2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / (1 \text{ mol} \times 273.15 \text{ K}) = 8.31 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

となる。

※なお、 $[\text{m}^3 \cdot \text{Pa}] = [\text{m}^3 \cdot \text{N}/\text{m}^2] = [\text{m} \cdot \text{N}] = [\text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^2] = [\text{J}]$ (表 5.2 参照)

であるから、SI 単位系で表した R の単位としては $[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$ がよく用いられる。

- 【5.2】 この溶液 1L について考える。密度が 1.01 g/mL であるから、1 L の溶液の質量は 1010 g (1.01 kg) である。また、Na の原子量は 35.5 なので、塩化ナトリウム NaCl の式量は 58.5 である。溶液 1 L に 0.15 mol の NaCl が溶けているから、溶液 1 L 中に溶けている NaCl の質量は

$$58.5 \times 0.15 = 8.78 \text{ g} \quad (8.78 \times 10^{-3} \text{ kg})$$

である。したがって、溶液 1 L 中の溶媒、すなわち水の質量は

$$1010 - 8.78 = 1001 \text{ g} \quad (1.00 \text{ kg})$$

となる。これらより、

$$\text{質量モル濃度} : 0.15 \text{ mol} \div 1.00 \text{ kg} = 0.15 \text{ mol/kg}$$

$$\text{質量パーセント濃度} : (8.78 \times 10^{-3} \text{ kg} \div 1.01 \text{ kg}) \times 100 = 0.87\%$$

と求まる。

- 【5.3】 水およびエタノールの密度を考慮すると、 100 mL ($0.1 \text{ L} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) の水の質量は $1.0 \times 10^{-1} \text{ kg}$ 、 15 g ($1.5 \times 10^{-2} \text{ kg}$) のエタノールの体積は 19.0 mL であるとわかる。したがって、この溶液全体の質量は 115 g 、体積は 119 mL となる。またエタノールの分子量は 46 であるから、 15 g のエタノールの物質量は 0.326 mol である。これらより、

$$\text{モル濃度} : 0.326 \text{ mol} \div 0.119 \text{ L} = 2.74 \text{ mol/L}$$

$$\text{質量モル濃度} : 0.326 \text{ mol} \div 0.1 \text{ kg} = 3.26 \text{ mol/kg}$$

$$\text{質量パーセント濃度} : 15 \text{ g} \div (100 \text{ g} + 15 \text{ g}) \times 100 = 13.0\%$$

となる。

- 【5.4】 (1) 質量パーセント濃度 1.0% のグルコース水溶液 100 g は、 1.0 g のグルコースと 99 g の水からなる。また、質量パーセント濃度 1.0% のスクロース水溶液 150 g は、 1.5 g のスクロースと 148.5 g の水からなる。

両者を混合してできる混合水溶液全体の質量は 250 g であり、この中にそれぞれグルコース 1.0 g とスクロース 1.5 g が含まれる。したがって、

$$\text{グルコースの質量パーセント濃度} : 1.0 \text{ g} \div 250 \text{ g} \times 100 = 0.4\%$$

$$\text{スクロースの質量パーセント濃度} : 1.5 \text{ g} \div 250 \text{ g} \times 100 = 0.6\%$$

となる。

(2) グルコースの分子量は 180, スクロースの分子量は 342 であるから, 1.0 g のグルコースの物質量は $5.56 \times 10^{-3} \text{ mol}$, 1.5 g のスクロースの物質量は $4.39 \times 10^{-3} \text{ mol}$ である。水の一部が蒸発した後の溶液の体積は $190 \text{ mL} = 0.19 \text{ L}$ であり, この中にはじめの混合溶液中のグルコースとスクロースが溶解しているから,

$$\text{グルコースのモル濃度} : 5.56 \times 10^{-3} \text{ mol} \div 0.19 \text{ L} = 2.93 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

$$\text{スクロースのモル濃度} : 4.39 \times 10^{-3} \text{ mol} \div 0.19 \text{ L} = 2.31 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

となる。

【5.5】 (1) 0.5 mol/L の A の水溶液 500 mL には, 0.25 mol の A が溶解している。化学反応式より, A が 2 mol 消費されると B が 1 mol 消費されることがわかる。したがって, 0.25 mol の A が完全に消費されるときに消費される B の物質量は $0.25 \div 2 = 0.125 \text{ mol}$ である。この水溶液に 0.15 mol の B を加えて反応を行ったから, 反応終了後に水溶液中に残存した B の物質量は $0.15 \text{ mol} - 0.125 \text{ mol} = 0.025 \text{ mol}$ である。すなわち, 反応後の水溶液 500 mL 中に 0.025 mol の B が残存していることになる。また, 化学反応式より, C の生成量は A の消費量の 2 分の 1 であることがわかるから, 反応終了後の水溶液中には $0.25 \div 2 = 0.125 \text{ mol}$ の C が溶解していることになる。したがって,

$$\text{B のモル濃度} : 0.025 \text{ mol} \div 0.5 \text{ L} = 0.05 \text{ mol/L}$$

$$\text{C のモル濃度} : 0.125 \text{ mol} \div 0.5 \text{ L} = 0.25 \text{ mol/L}$$

となる。

(2) 問題文より, 反応開始時の水溶液中の A および B のモル濃度はそれぞれ 0.5 mol/L, 0.3 mol/L である。また問題文および(1)より, 1800 秒後 (反応終了時) の A および B のモル濃度はそれぞれ 0 mol/L, 0.05 mol/L である。したがって, 1800 秒間における平均速度を求めると,

$$\text{A の平均消費速度} : (0.5 \text{ mol/L} - 0 \text{ mol/L}) \div 1800 \text{ s} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$$

$$\text{B の平均消費速度} : (0.3 \text{ mol/L} - 0.05 \text{ mol/L}) \div 1800 \text{ s} = 1.39 \times 10^{-4} \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$$

となる。

★6 章

【6.1】 カルシウム, 酸素の原子量はそれぞれ 40.1, 16.0 であるので, 酸化カルシウム CaO の式量は 56.1 である。酸化カルシウム 25 g (0.446 mol) が水と完全に反応したとき発生する熱量は, $63.7 \times 0.446 = 28.4 \text{ kJ}$ である。このうち 90% が円筒容器内の水に伝わり, 円筒容器内の水に伝わった熱の 15% が外部に放熱されたため, 円筒容器内の水に蓄えられた熱エネルギーは $28.4 \times 0.90 \times 0.85 = 21.7 \text{ kJ}$ となる。20°C の水の密度を $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とすると, 180 mL の水の質量は 0.18 kg

であるから、上記と比熱の値より、円筒内の水の温度上昇は

$$21.7 \text{ kJ} \div 4.2 \text{ kJ/(kg K)} \div 0.18 \text{ kg} = 28.7 \text{ K}$$

であることがわかる。もともと 20°C であったので、求める水の温度は 48.7°C となる。

- 【6.2】 (1) 式 (6.2), 図 6.4 に基づき各項の内容について考える。湖中の有機物の蓄積速度は、湖の水の体積を V と置くと、湖内の有機物濃度の時間変化 dC/dt より,

$$V dC/dt \text{ と表せる。湖の水位が一定に保たれていることから,}$$

水の流入量=流出量= F
であるので、有機物の流入速度、流出速度はそれぞれ FC_{in} , FC_{out} と表せる。また、湖における有機物の分解速度は VkC と表せる。したがって、これらを式(6.2)に当てはめると(有機物の分解速度については、有機物濃度が減少する反応なのでマイナスをつける),

$$V dC/dt = FC_{in} - FC_{out} - VkC$$

と書ける。両辺を V で割って整理すると,

$$dC/dt = (F/V)(C_{in} - C_{out}) - kC \quad (*)$$

を得る。

- (2) 「湖中の有機物濃度が一定に保たれている」ということは、湖中の有機物濃度の時間変化(蓄積速度)がゼロであることにほかならない。したがって、(*)式において $dC/dt=0$ とくと,

$$(F/V)(C_{in} - C_{out}) - kC = 0$$

となり、これを C について解くと,

$$C = F(C_{in} - C_{out})/(Vk)$$

となる。

- 【6.3】 (1) 例題 6.2 で得られた物質収支式

$$V \frac{dC}{dt} = -FC$$

は変数分離型の1階微分方程式であるから、変数を両辺に分離して両辺積分すれば、初期条件より解が求まる(数学的な事項は各自学習せよ)。上式の変数(C および t)を両辺に分離し、定数 V , F を一方の辺にまとめると,

$$(1/C)dC = -(F/V)dt$$

と変形できるので、両辺をそれぞれ積分すると

$$\ln C = -(F/V)t + \text{Const.}$$

を得る(Const.は積分定数)。

初期条件($t=0$ のとき, $C=C_0$)より, $\text{Const.} = \ln C_0$ であるので、これを代入して整理すると、求める式として

$$\ln(C/C_0) = -(F/V)t \quad (**)$$

または

$$C=C_0 \exp\{-(F/V)t\}$$

が求まる。

(2)「バケツ内のインク濃度が初めの 100 分の 1」であることは、 $C=C_0/100$ であることに対応する。また、 F/V は「単位時間あたりにバケツ何倍分の水を流したか」という量に相当するから、 $(F/V)t$ が 1 のとき、バケツの容積と等しい水がバケツに入れられ、あふれていったことになる。すなわち、 $C=C_0/100$ を(**)式に代入したとき、 $(F/V)t$ がいくらになるかを求めればよい。したがって、

$$\ln(1/100) = -4.61 = -(F/V)t$$

より、 (F/V) は 4.61 となるから、求める水道水量はバケツ容積の 4.61 倍と求まる。

【6.4】 式 (6.2)、図 6.4 に基づき各項の内容について考える。微小空間の断面積を A 、微小空間の厚さを dx とおくと、微小空間の体積

$$V = Adx$$

と表せるから、微小空間内におけるこの分子の蓄積速度は

$$Adx \times dC/dt$$

と表せる。流入速度および流出速度は、微小空間の出入り口における流束 J を用いてそれぞれ

$$A \times (-J_{x+dx}) \text{ および } A \times (-J_x)$$

と表すと（図では分子の流入の方向が x 軸と逆方向なので流束にはマイナスの符号をつけてある）、反応による分子の生成・消失がない場合は、式 (6.2) より

$$Adx \times dC/dt = -A(J_{x+dx} - J_x)$$

と表せる。両辺を A で割り、 dx が非常に小さい場合の極限をとると、微分の定義より

$$\lim_{dx \rightarrow 0} -(J_{x+dx} - J_x) = -dJ/dx$$

であるから、求める物質収支式として

$$\partial C / \partial t = -\partial J / \partial x$$

を得る。ここで、 ∂ は「ラウンドディー」または「ラウンド」などと読み、本式が複数の変数を含む偏微分方程式であることを示す。

【6.5】 微生物の元素組成は、各元素の質量割合をそれぞれの原子量で割った値の比となる。すなわち、

$$C:H:O:N = 47.0/12.01 : 6.5/1.01 : 31.0/16.00 : 7.5/14.01 = 1 : 1.64 : 0.50 : 0.14$$

となる。したがって、この微生物の組成比は $CH_{1.64}O_{0.50}N_{0.14}$ と表され、

$$x=1.64, y=0.50, z=0.14$$

と求まる。

★7章

- 【7.1】 文章中空いている順に
反応速度 化学平衡 活性化エネルギー
- 【7.2】 触媒とは、少量で化学反応を促進するが自分自身は変化しない物質のこと。
- 【7.3】 タンパク質はアミノ酸がペプチド結合でつながった高分子だが、特有の形に折り畳まれて酵素など固有の機能を持つ。主にはアミノ酸がペプチド結合したポリマーである。タンパク質の構造は、アミノ酸の配列を一次構造、部分的な規則構造を二次構造、アミノ酸の側鎖間の相互作用により形成される三次元的に折りたたまれた構造を三次構造、三次構造を持ったポリペプチドが会合した状態を四次構造と言う。
- 【7.4】 鍵と鍵穴説 誘導適合説
- 【7.5】 至適温度：化学反応は一般に温度が高いほど速くなるが、酵素はタンパク質なので高温では失活する。酵素反応は熱エネルギーによる活性化と酵素の熱変性のために至適温度が生じる。低温では温度の上昇とともに反応速度は増大するが、高温になると熱変性により反応速度は低下する。
- 至適 pH：酵素活性の pH 依存性は通常は生理的条件の中性付近にて最大活性を示す。しかし、胃酸の存在下で働く消化酵素などの至適 pH は酸性である。働く条件に応じて至適 pH を示すものが多い。

★8章

- 【8.1】 8.1 節参照。
- 【8.2】 8.2.1 項参照。原料（基質）および生産物（菌体や菌体により生産される代謝産物）の消長（各物質の濃度の経時変化）をしっかりと理解しておくことが重要である。
- 【8.3】 8.2.2 項〔1〕 a) 参照。他のタイプのバイオリアクター（特にエアリーフト型バイオリアクター）との比較で、構造上の違いを把握しておくことが重要である。
- 【8.4】 8.2.2 項〔1〕 b) 参照。他のタイプのバイオリアクター（特に通気攪拌型バイオリアクター）との比較で、構造上の違いを把握しておくことが重要である。

★9 章

- 【9.1】 カットしたスイカの方が先に食べごろの温度に冷える。主な理由は、カットすることにより、体積当たりの表面積が増大し熱エネルギーの移動が促進されること（6.3 節で述べたように、熱エネルギーの移動量は境界の断面積×熱流束で表される）、表面から中心部までの距離が短くなることで短時間で中心部が冷やされることがあげられる。

- 【9.2】 演習問題【6.4】で導出される物質収支式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}$$

の物質移動流束にフィックの法則（式（9.5））を代入する。ただし、ここでは、演習問題【6.4】に合わせて物質移動方向を x 軸とした。その結果、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = -(\frac{\partial}{\partial x})\{-D(\frac{\partial C}{\partial x})\} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

となり、これがフィックの第二法則（ $\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ ）である（ $(\frac{\partial C}{\partial x})^2$ と $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ はぜんぜん違うものなので注意すること）。

- 【9.3】 式（9.9）より、

$$C^* = P^*/H$$

が成り立つ。空気中の酸素のモル分率は 0.2 であるから、大気圧下にある空気中の酸素分圧は $1.013 \times 10^5 \times 0.2 = 2.026 \times 10^4 \text{ Pa}$ である。この値とヘンリー定数の値を上式に代入すると、指定された条件における酸素の溶解度は

$$C^* = 2.026 \times 10^4 \text{ Pa} \div 7.3 \times 10^4 \text{ Pa m}^3/\text{mol} = 0.28 \text{ mol/m}^3$$

と求まる。酸素 O_2 の分子量を考えると、質量基準では $8.9 \text{ g/m}^3 = 8.9 \text{ mg/L}$ となる。

- 【9.4】 (1) 攪拌速度：攪拌速度を増大させると、 $k_L a$ は増加する。気液界面近傍の流れを速くすることで、液側境膜の物質移動係数 k_L を大きくすることができるためである。ただし、通常の通気攪拌型の培養槽ではすでに十分な攪拌により乱流状態が達成されており、さらに攪拌速度を増大させることによる酸素移動促進効果は限定的な場合が多い。
- (2) 供給ガス中の酸素分圧：供給ガス中の酸素分圧は、 $k_L a$ には影響しない。ただし、酸素分圧を高くすることで界面近傍における酸素の濃度勾配を大きくできるため、酸素移動速度自体は増大する。
- (3) 供給ガスの全圧：供給ガスの全圧は $k_L a$ には影響しない。ただし、全圧を高くすることで酸素分圧が高くなり、界面近傍における酸素の濃度勾配を大きくできるため、酸素移動速度自体は増大する。
- (4) 気泡の直径：気泡の直径を増大させると、 $k_L a$ は減少する。大きな気泡は体積当たりの表面積（比表面積という）が小さいため、気泡が大きくなると通気量当たりの気液界面積 a が小さくなり $k_L a$ は減少する。

- (5) 培養液の粘度：培養液の粘度が増大すると、 k_{LA} は減少する。粘度の増大により攪拌による液相の乱れが小さくなり液境膜が厚くなることに加え、気泡を細分化することが難しくなるため k_{LA} は減少する。

- 【9.5】 95℃ (368 K) および 115℃ (388 K) における熱死滅速度定数をそれぞれ k_{368} および k_{388} とおき、それぞれについてアレニウスの式が成り立つとすれば次式が得られる。

$$k_{368} = A \exp(-E_a/368R)$$

$$k_{388} = A \exp(-E_a/388R)$$

両式の両辺の対数を取り、それぞれ差をとると次式を得る。

$$\ln(k_{388}/k_{368}) = (E_a/R)(1/368 - 1/388) \quad (*)$$

(*)式に $E_a = 283 \text{ kJ/mol}$ ($2.83 \times 10^5 \text{ J/mol}$), $R = 8.31 \text{ J/(mol K)}$ を代入すると、

$$\ln(k_{388}/k_{368}) = 4.77$$

となるから、

$$k_{388}/k_{368} = e^{4.77} \doteq 118$$

となり、115℃における熱死滅速度定数は 95℃における熱死滅速度定数の 118 倍程度であることがわかる。

栄養成分の熱破壊速度定数についても同様に、(*)式に $E_a = 35 \text{ kJ/mol}$ ($3.5 \times 10^4 \text{ J/mol}$), $R = 8.31 \text{ J/(mol K)}$ を代入して計算すると、115℃における熱破壊速度定数は 95℃における熱破壊速度定数の 1.8 倍程度であることがわかる。

★10 章

- 【10.1】 一般に化学反応速度は、反応温度が 10℃上昇すると約 2 倍になる (参考：アレニウスの式)。酵素反応も化学反応の一種であるので、これに準じた挙動を示す。しかし一方で、酵素はタンパク質であるため、活性を発現する最適 (あるいは至適) 温度が存在しており、これ以上の温度域では、立体構造の不可逆的な変化が生じて活性が低下する場合がある。温度以外にも、pH, 基質濃度、あるいは各種金属イオンなどが酵素反応に影響をおよぼす環境因子として知られている。他章 (7 章など) にも関連事項の解説あり。

- 【10.2】 Lineweaver-Burk プロット (10.4.1 項参照) により、作図によって求める。すなわち問表 10.1 に示されている「基質濃度および初速度」の組合せからなる 6 つの結果のそれぞれについて、その逆数、「 $1/(\text{基質濃度})$ および $1/(\text{初速度})$ 」からなる 6 つの数値の組合せを算出する。例えば、「 $5.6 \times 10^{-3} \text{ M}$ および $1.6 \times 10^{-4} \text{ M} \cdot \text{min}^{-1}$ 」については「 $0.18 \times 10^3 \text{ M}^{-1}$ および $0.61 \times 10^4 \text{ M}^{-1} \cdot \text{min}$ (正確にはそれぞれ 1.8×10^2 および 6.1×10^3 と記すべきであるが、作図の都合上、前述の表記とした)」が得られる。

これらの数値を、「 $1/(\text{基質濃度})$ 」(横軸) vs. 「 $1/(\text{初速度})$ 」(縦軸) か

らなるグラフ上にプロットする（この際の「横軸」および「縦軸」の目盛設定としては、位取りの数値と単位とを含める形で、それぞれ ($\times 10^3 \text{ M}^{-1}$) および ($\times 10^4 \text{ M}^{-1} \cdot \text{min}$) とすると、作図が容易である)。プロットした数値を結ぶ直線がそれぞれの軸と交わる切片の値をグラフから読み取ると、横軸： $-0.082 \times 10^3 \text{ M}^{-1}$ 、縦軸： $0.19 \text{ M}^{-1} \cdot \text{min}$ （この数値表記の取り扱いも前出と同様）となる。こららがそれぞれ ($-1/\text{Km}$) および ($1/\text{Vm}$) に相当するので、 $\text{Km} = 1.22 \times 10^{-2} \text{ M}$ 、 $\text{Vm} = 5.26 \times 10^{-4} \text{ M} \cdot \text{min}^{-1}$ が得られる。

なお、表計算・統計処理などの PC ソフトを利用すれば計算自体は容易であるが、その際には実験数値に対する「外れ値検定」を事前に行うなどの特段の配慮が必要であろう。

【10.3】 何段階かの基質濃度を設定して酵素反応を行い、それぞれその初速度を測定する。得られた実験結果に基づいて前問と同様の Lineweaver-Burk プロットを行い、各定数を算出するとともに、グラフの形状について無添加系の場合のものと比較することにより、阻害型式を判定する（本文 10.3 節参照）。

【10.4】 ①×：基質は酵素に対して過剰に添加することが必要
 ②○
 ③×： $\text{kcat} = \text{Vm} / \text{CEO}$ であり酵素濃度が分からないと算出できない。

【10.5】 菌体の増殖は、菌体内における複数の酵素反応の組合せの結果生じる現象であると考えられるので、それ自体が酵素反応と類似の挙動を示すことは理に適っていると考えられる。

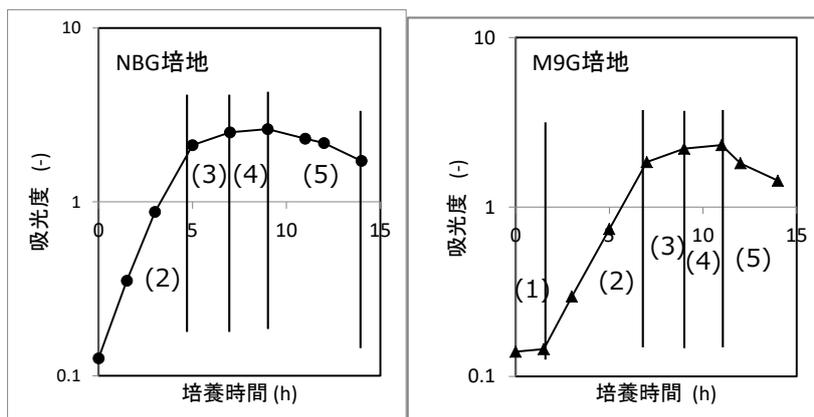
【10.6】 酵素活性： $(100 \mu \text{ mol}) / (5 \text{ min}) = 20 \mu \text{ mol} / \text{min}$ なので 20 U
 反応速度：生成した生産物の濃度は $(100 \mu \text{ mol}) / (100 \text{ mL}) = 1 \text{ mM}$ であるので速度は $(1 \text{ mM}) / (5 \text{ min}) = 0.2 \text{ mM} / \text{min}$

★11 章

【11.1】 $t_d = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu$ への式の展開（省略、本文 11.3 節参照）
 世代時間 $t_d = 20 \text{ 分} = 0.33 \text{ 時間}$ なので、比増殖速度 μ は
 $\mu = \ln 2 / t_d = 0.693 / 0.33 = 2.1 \text{ h}^{-1}$

【11.2】

(1)



解図 11.1

- (2) (1)誘導期, (2)対数増殖期, (3)減速期, (4)静止期, (5)減衰期として解図 11.1 に示した。
- (3) NBG 培地 0.56 h^{-1} , M9G 培地 0.46 h^{-1} (解図 11.1 の対数増殖期のプロットについて近似曲線を求める)

【11.3】 (1) $10^5 \times 1(\text{ml}) \div 1000(\text{ml}) = 10^2 \text{ 個/ml}$

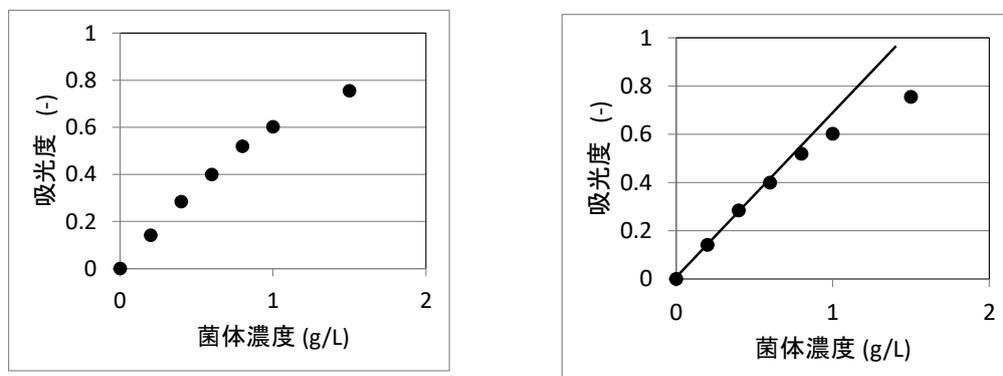
(2) 倍加時間 21 分 = 0.35 時間, $\mu = \ln 2 / t_d = 0.693 / 0.35 = 1.98 \text{ h}^{-1}$

(3) $5 \div 0.35 = 14.3$ (分裂回数)

$$10^2 \times 2^{14.3} = 2.02 \times 10^6 \text{ 個/ml}$$

※ 教科書の問題文では 24 時間となっておりますが, 実際にはありえない数値でしたので, 5 時間に変更して計算してください。

【11.4】 問表 11.2 のデータを普通軸にプロットすると解図 11.2 のようになる。菌体濃度 0.6 g/L (吸光度 0.399) を越えたあたりから, 菌体濃度と吸光度の間の比例関係が維持できなくなっている。従って, 菌体濃度 0.6 g/L 以上の高菌体濃度を測定する場合は, 吸光度 0.4 以下になるよう適宜希釈して測定後, 希釈倍率を掛けて菌体濃度を求める必要がある。



解図 11.2

★12 章

【12.1】ポリペプチドの生産濃度は以下のように算出される。

$$\begin{aligned} & \text{菌体濃度} \times (\text{菌体に対する全タンパク質量の割合}) \\ & \quad \times (\text{全タンパク質に対する目的ポリペプチドの割合}) \end{aligned}$$

従って、各条件での生産濃度は

$$\text{条件 1 ; } 45.7 \times 0.5 \times 0.072 = 1.65 \text{ g/L}$$

$$\text{条件 2 ; } 24.0 \times 0.5 \times 0.273 = 3.28 \text{ g/L}$$

$$\text{条件 3 ; } 44.1 \times 0.5 \times 0.216 = 4.76 \text{ g/L}$$

【12.2】分化細胞からカルス細胞を誘導し、液体培養によりカルス細胞培養を行う。植物ホルモンを調整した培地に植物の一部を植えると、分化していた細胞が脱分化して細胞分裂を繰り返し、ある程度の細胞の塊（カルス）が生じる。カルス細胞の培養には、Murashige-Skoog 培地、Heller の培地などが使用される。

【12.3】バキュロウイルスは、昆虫を主な宿主として感染する核多角体病ウイルスであり、増殖過程で感染細胞の核内にポリヘドリンと呼ばれる結晶構造のタンパク質を形成する。このバキュロウイルスに外来遺伝子を組み込み、昆虫細胞に感染させて目的タンパク質を発現することができる。宿主に用いられる細胞株としては、*Spodoptera frugiperda* 由来 Sf9 株や *Trichoplusia ni* 由来の BTI-TN-5B1-4 (HighFive) が広く利用されている。

★13 章

【13.1】

- ・常温・常圧の温和な条件で反応する。
- ・反応の特異性が高く、副生成物が少ない。
- ・危険な化学物質を使わず反応の安全性が高い。
- ・生分解性の触媒であり、難分解性の廃棄物を出さない。 など

【13.2】シクロデキストリン、オリゴ糖（マルトトリオース，マルトテトラオース），水あめ，グルコースなど。

【13.3】二重結合はシス型とトランス型があるが、天然の不飽和脂肪酸はほとんどシス型である。炭化水素鎖は二重結合のところで折れ曲がる。そのため、飽和脂肪酸に比べて不飽和脂肪酸は分子が隣同士きっちりと空間を埋めることができなくなり、その結果融点が低くなる。

【13.4】医薬品が不斉炭素を持つ場合は、ラセミ体ではなく薬効を持つ光学活性体であることが要求されている。その理由は、薬効を持たない異性体が好ましくない薬理

作用を持つ危険性があること、また、弱い薬効であったとしても不要物を合成することになるからである。酵素反応は立体認識に優れた触媒であり、無駄なものを作らないというグリーンケミストリーの観点において医薬品の合成の一手段として認知されている。

- 【13.5】 世界初の抗生物質はペニシリンで1929年にフレミングより発見された。以降、メチシリンやバンコマイシンなど多くの抗生物質が発見され、細菌による感染症の治療に用いられている。しかし、ヒトが抗生物質を使い始めると、その抗生物質に耐性を持つ微生物が出現するようになった。耐性株は遺伝子の突然変異などにより抗生物質の分解能力などを持つようになり、また、耐性の原因となる遺伝子は他の細菌にも伝播するので、抗生物質の使い過ぎは耐性菌がより多く生育する環境を生み出すことになる。耐性菌が出現するとヒトは新しい抗生物質を合成し、あるいは自然界から発見したが、それに対する耐性菌が次々に出現するという、いたちごっこの状況が生じている。

★14章

- 【14.1】 タンパク質がエネルギー源として利用される場合、まず構成単位であるアミノ酸に分解される。つぎにアミノ酸からアミノ基がアンモニアとして除かれ、それにとまって生じたカルボン酸がエネルギー代謝系に導かれて分解される。したがって、タンパク質の生物学的処理ではアンモニアが発生する。
- 【14.2】 リンと窒素はタンパク質、核酸、膜脂質などの生体成分の重要な構成要素である。富栄養化の発端となる植物や藻類などの独立栄養生物にとっても窒素とリンは多量に必要なが、それらの生物が取り込める形態（塩）の窒素とリンは通常的环境中では不足気味である。したがって、窒素とリンは植物や藻類などにとって実質的な生育制限因子となっており、代表的な栄養塩類である。
- 【14.3】 生物学的窒素除去とは理想的には脱窒（硝酸の窒素分子への還元）をもたらすことである。好気処理では硝化（アンモニアの硝酸への酸化）は進行するものの脱窒（硝酸の窒素分子への還元）は起こらない。嫌気処理では逆に硝化は起こらないが脱窒は進行する。したがって、好気処理と嫌気処理を適切に組み合わせれば生物学的窒素除去が達成される。
- 【14.4】 高度に嫌氣的な環境ではメタン菌と硫酸還元菌が競合している。硫酸イオン濃度が高ければ硫酸還元菌が優勢となりメタンの発生量は低下し、その代わりとして硫化水素の発生量が増大すると考えられる。
- 【14.5】 固液分離障害をきたした活性汚泥に凝集剤を添加して凝集させれば障害は取り

除かれると考えられる。また、糸状性の原因微生物を選択的に死滅させることによっても障害を取り除くことができるはずである。

【14.6】 生物膜法では担体が必要なため装置構成が複雑なうえに定期的に担体を引き上げて洗浄する必要がある、大規模な施設での運用は難しく水質の変動が少ない排水を大量に処理するのであれば活性汚泥法のほうが優れていると考えられる。

【14.7】 嫌気処理において発生する水素は最終的にはメタン発酵の基質となりメタンに変換される。水素を回収するにはメタン発酵を選択的に抑制する技術の確立が必要と考えられる。

★15章

【15.1】 植物が生育するときに炭酸ガスを吸収しているため、カーボンニュートラル(ライフサイクル全体で見ると大気中の二酸化炭素は増加せず、収支はゼロとなること)が成り立つため。

【15.2】 これまでの化学工業は化石資源を原料として発展してきたが、バイオマス为原料としてエネルギーや一連の化学製品を作り出すことをバイオリファイナリーという。トウモロコシやサトウキビなどの可食部分を原料にして燃料用エタノールが生産されている。今後は、食糧と競合しないバイオマスの非可食部分の利用が求められている。そのためには、木質からのセルロースの取り出し方やセルロースの糖化に関する技術開発の推進が必要である。

【15.3】

- ① 遺伝子組換え植物：遺伝子を導入したアグロバクテリウムを植物に感染させ遺伝子組換え植物をつくる。害虫への抵抗性を示す作物や除草剤への耐性を示す作物が栽培されている。
- ② トランスジェニック動物：受精卵に遺伝子を導入し外来遺伝子を持ち、卵や乳に治療用のタンパク質を蓄積させること出来る。
- ③ 遺伝子治療：遺伝子の異常で疾病となっている患者に、正常な遺伝子をリンパ球などに導入することで機能不全に陥っている細胞の欠陥を修復や修正することによる治療をいう。

【15.4】 遺伝子の情報によりタンパク質がつくられゲノム情報は生物の設計図である。設計図が解れば、その生物の情報を網羅的に推定することができる。未知のタンパク質を見つけることが出来る。病気の原因を知ることができ、治療や薬の開発につながる。

- 【15. 5】 再生医療は人為的に再生させた組織や器官を材料にする医療をいう。ES 細胞はその良い材料ではあるが、倫理的（個体の萌芽である受精卵を使用する）、技術的（卵の確保、拒絶反応）、そして法的問題がある。最近では、体細胞（皮膚などの普通の細胞）に遺伝子操作を施して脱分化させ、分化の全能性をもたせた人工多能性幹細胞（iPS 細胞）の研究が進んでいる。この方法だと自身の組織から再生組織をつくることができ、倫理的な問題も少ない。