

日本生物学オリンピック 2021

予選問題

2021年7月18日（日）

〈正解・解説〉



問1) 【正解】C 【部分点】(配点の3/10) A B F I

【解説】PCR法に関する基本的な問題である。プライマーとはDNAの合成を開始するのに必要な短いDNA断片で、目的のDNAをはさむように2種類のプライマーを使用する。本問では2本鎖を図示すると理解しやすい(下図)。問題文中の塩基配列は「鎖1」となり、その相補鎖は「鎖2」ようになる。図中の赤字で示した配列がプライマーになる。つまり、「鎖1」の5'末端の配列が「鎖2」のプライマーになり、「鎖1」の3'末端の塩基配列の逆相補的配列で、「鎖1」の3'末端から5'側へ相補的な塩基を並べた配列が「鎖1」のプライマーになる。



問2) 【正解】C 【部分点】(配点の3/10) F H

【解説】大腸菌のDNAリガーゼは、岡崎フラグメント同士を結合する酵素である。岡崎フラグメントは、DNA複製の際のラギング鎖で新規に合成される比較的短いDNA断片である。リーディング鎖での新規のDNAにおいては、岡崎フラグメントは形成されず、DNAポリメラーゼによって連続的に合成される。

したがって、DNAリガーゼが完全に阻害された場合、岡崎フラグメントは結合されずに、短いDNA断片のまま残ることになるので、説明③が推定される。

DNAリガーゼが阻害されたとしても、リーディング鎖では連続したDNA合成が進み、長いDNA断片も合成されるので、説明②は否定される。

また、この実験系では非同調的に培養しており、さまざまなDNA複製の時期の細胞が存在することになるので、DNAリガーゼ阻害剤がなかったとしても、DNAリガーゼによってまだ結合されていない短いDNAも存在するため、説明①も否定される。

問3) 【正解】 E 【部分点】 (配点の 5/10) D (配点の 3/10) B (配点の 1/10) A

【解説】 1 個体の細菌が $2^{15} = 32768$ 個体の細胞になるまでに、32767 回の細胞分裂が起きたことになるので、総細胞分裂数は 32767×100 である。突然変異体が 1 個体検出された場合、突然変異が 1 回起きたことになる。突然変異体が 2 個体検出された場合、少なくとも 1 回の突然変異が起きたことになる。一方、突然変異体が 12 個体検出された場合は、少なくとも 2 回の突然変異が起きたことになる。(1 つの突然変異体はその後の分裂で 8 個体になり、もう 1 つの突然変異体はその後の分裂で 4 個体になった。) したがって、合計で少なくとも 4 回の突然変異が起きたことになる。突然変異率は低いと仮定しているので、総突然変異数は 4 (可能性のある中でもっとも少ないもの) と考えるのが妥当である。したがって、細胞分裂あたりの突然変異率は、 $4 \div (32767 \times 100) \approx 1.2 \times 10^{-6}$ となる。

定義に従えば、総細胞分裂数は 32767×100 である。総細胞分裂数を 32768×100 とするのは間違いであるが、その違いはわずかであるので、部分点を与える。

なお、専門書には細胞分裂あたりの突然変異率の推定式が紹介されている。それによれば、細胞分裂あたりの突然変異率は、 $-\log_e(97 \div 100) \div 32767 \approx 9.3 \times 10^{-7}$ となる。しかし、この推定式は培養が同調的に行われたかどうか不明なときに利用されるものであり、本問題には適用できない。

〈参考文献〉

Luria SE, Delbrück M (1943) Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance. *Genetics* 28:491-511.

問4) 【正解】 C 【部分点】 (配点の 3/10) A B

【解説】 物質 B と物質 C を含まない培地では、X と Y の触媒反応をもつ酵素が発現することで大腸菌は増殖することができる。変異株 ΔY の結果から、Gene3 と Gene4 の産物のいずれもが反応 Y の触媒活性をもっていることが確認できた。反応 X と反応 Y の両方の活性が失われた変異株 ΔXY をもちいた実験で、反応 Y を回復させる Gene3 あるいは Gene4 とともに Gene1 を組み合わせなければ増殖がみられなかったため、Gene1 が反応 X に関与することがわかる。

問5) 【正解】 D 【部分点】 (配点の 3/10) C J (配点の 1/10) B I

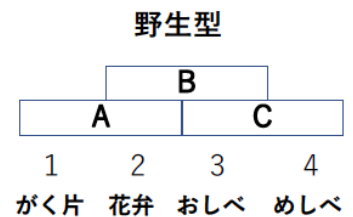
【解説】 切り花は多くの葉をもたないことが多く、光合成による糖質の生成は限られる。したがって、貯蔵されていた糖質を呼吸のために消費し、結果として老化にいたる。糖質を添加することでこういった呼吸の維持が可能となるが、その他に花卉細胞の膨圧の維持や吸水の促進などの水分バランスを良好にする効果もあると考えられている。ショ糖を添加すると、エチレンの生成ピークの遅延や最大生成量の低下が起こることが観察される。このようにエチレンに反応しやすい植物の切り花では、糖質とエチレンは密接に関係しており、糖質添加によってエチレンに反応する性質の遅延が、切り花の品質保持に効果があるとされている。

〈参考資料〉

Ichimura K. and Suto K. (1999) Effects of the time of sucrose treatment on vase life, soluble carbohydrate concentrations and ethylene production in cut sweet pea flowers. *Plant Growth Regulation* volume 28, pages 117-122.

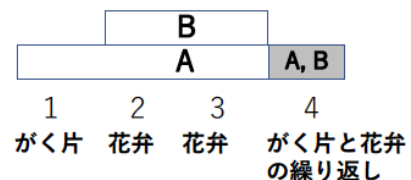
問6) 【正解】 F 【部分点】 (配点の 3/10) C D E (配点の 1/10) L

【解説】 ABC モデルの基本原理は被子植物全般に適用できると考えられている。しかしながら種により関わる遺伝子やその機能が少しずつ異なっている点も明らかになってきた。また A クラス遺伝子, B クラス遺伝子, C クラス遺伝子はそれぞれ1つずつ存在するというのではなく, 実際にはそれぞれのクラスの機能を担う遺伝子が複数存在していることもわかってきた。この数や機能の少しの違いの組合せで花器官の多様性が説明されそうなこともわかってきた。



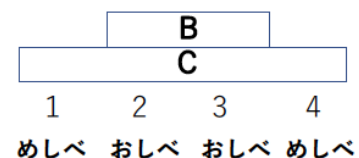
C クラス遺伝子のはたらきは, めしべの発生を決定する (ルール 1) ことに加えて, フロリゲンのはたらきにより茎頂分裂組織が花分裂組織に変わることにより, 分裂組織に存在していた幹細胞の活性を抑制し, 無限成長から有限成長に切り替えるはたらきも担っている (ルール 3)。したがって, C クラス遺伝子が機能を失った変異体では, 領域 4 にめしべを作ることができず, またこの領域 4 に幹細胞の活性が残るため, 花器官の発生を繰り返す。C クラス遺伝子がないためおしべやめしべは形成されず, A クラス遺伝子と B クラス遺伝子の発現が繰り返された結果, がく片と花弁からなる花器官の発生を繰り返すと考えられる。このように C クラス遺伝子の変異は, 幾重にも花弁が重なる八重咲きの一因となっている。いくつかの教科書では C クラス遺伝子の変異体では, 簡略化のために領域 4 にがく片が形成されると記載されていることもあるが, 本問題のように実際には, がく片, 花弁のセットが入れ子状に繰り返し, 2 次花, 3 次花が形成される。

C クラス遺伝子の活性を抑えた変異体



2 つ目の変異体は, たとえば C クラス遺伝子の機能獲得型が花分裂組織全体で発現するような場合などが考えられる。C クラス遺伝子を強制的にすべての領域で発現させることにより, 元々あった A 遺伝子の発現が抑制される (ルール 2)。したがって, この変異体は, A クラス遺伝子がはたらかなくなった変異体と同様な表現型になると考えればよい。アサガオのびわ咲きとよばれる変異体は, A クラス遺伝子の変異体にみえるものの, 実際には C クラス遺伝子の機能獲得型の変異体であると考えられている。

C クラス遺伝子を全ての領域で発現させた変異体



問7) 【正解】 E 【部分点】 (配点の 3/10) D F (配点の 1/10) B K

【解説】 虫媒花においては, より多くの昆虫を引き寄せる方が有利である。昆虫にとって花の数が多い方が目立ち, また採蜜の効率もよい。したがって, 花の数が多い方が有利であると推測される。

自家不和合性の植物では, 花粉は別の個体から運ばれる方が有利である。花の数が多くなると, 花粉が同個体から運ばれてくる可能性が上がり, 結実の可能性が下がる。したがって, 花の数が多いことは不利にはたらくと推測される。

虫媒 (花の数を増やす要因) と自家不和合性 (花の数を減らす要因) は相反する方向にはたらいっている (安定化選択) と考えられる。適応度はどれだけ次世代に子孫を残すかに関わっている。これは, 結実率でも, 花の数でもなく, 果実数である。この問題では, 花の数が 500~999 のとき, 平均果実数をもっとも高くなっている。

〈参考文献〉

Wyatt, R. (1980) The reproductive biology of *Asclepias tuberosa*: I. Flower number, arrangement, and fruit-set. *New Phytol.* 85:119-131.

問8) 【正解】A 【部分点】(配点の3/10) B (配点の1/10) F J

【解説】第1刺激で反応し、第2刺激で反応した場合、両方の物質に対する受容器が存在し、その受容器は異なっている。この結果、S1、S2、S4の受容器は存在し、S1とS4の受容器は異なっており、S2とS4の受容器は異なっている。第1刺激で反応し、第2刺激で反応しない場合、2つのことが考えられる。1つは、(順応を考慮して)両方の物質に対する受容器が存在し、その受容器は同じである可能性である。もう1つは、第1刺激に対する受容器は存在するが、第2刺激に対する受容器は存在しない可能性である。S2の受容器は存在するので、S1とS2の受容器は同じであると考えられる。一方、S3の受容器は存在しないと考えられる。

(参考文献)

山下智, 清原貞夫, 山崎浩一 (1985) 「水生動物の味覚」動物生理 2:98-105.

問9) 【正解】C 【部分点】(配点の3/10) H (配点の1/10) F J

【解説】腎臓におけるグルコースの再吸収に関する問題である。教科書的には、「グルコースは原尿に濾し出されるが、尿細管において100%再吸収される」とされている。しかし実際は、健康な成人であっても、血しょう中のグルコース濃度が高くなると、再吸収が追いつかずに尿中に排泄されることが図から読み取れる。したがって、①は誤り。原尿中のグルコース濃度は、このグラフからはわからない。したがって、この実験からは②が正しいと導き出せない。尿細管で再吸収されるグルコースの1分あたりの量は、原尿のグラフと尿のグラフの差に等しい。この差は最大で1分あたり240 mgとグラフから読み取れる。よって③は正しい。尿に排出されるグルコースの量は、血しょう濃度が0~200 mg/100 mLの範囲では0 mg/分である。この範囲において、尿に排出されるグルコースの量は、原尿に含まれるグルコースの量に比例しない。よって④は誤り。血しょう中のグルコース濃度が200 mg/100 mLを超えると、尿中にグルコースが排泄され始める。

問10) 【正解】E

【解説】アフリカツメガエルの初期発生を題材に、中期胞胚変移に関する問題である。カエル、ウニ、ショウジョウバエなどでは、受精後、胞胚期までは胚のゲノムからの転写が起こらず、卵内に蓄積されているタンパク質と mRNA からの翻訳で新たに生成されるタンパク質によって卵割が進行して行くことが知られている。カエルでは図にみられるように、11回の卵割までは転写が起こらないが、その後急速に転写が起こり、各割球の分裂にかかる時間も長くなり同調性を失っていく。こうした変化が起こるのがちょうど胞胚期中期なので、こうした変化を総称して中期胞胚変移とよんでいる。問題では、アクチノマイシン D 処理をしているので、転写のみが阻害されるため、12回目の分裂以降の RNA 合成がなくなる。それまでは、卵内の mRNA からの翻訳で新たにタンパク質が生成され、発生が進んでいるので、その時期までの分裂には全く影響しないと考えられる。そして卵内に蓄積されていた RNA が無くなってしまうと、卵割ができなくなってしまう。ちなみに哺乳類卵では、ゲノムからの転写はマウスでは1~2細胞期、ヒトでは4~8細胞期に急速に起こることが知られており、カエルなどとはまったく様相が異なる。

問 11) 【正解】 F 【部分点】 (配点の 5/10) B (配点の 3/10) G

【解説】 ホヤ胚の細胞分裂パターンには個体差がなく、各細胞には体系的に名前が付けられ、発生過程を通して細胞の分裂パターンと発生運命（細胞系譜）が詳しく調べられている。表皮、内胚葉、筋肉は、卵の細胞質に含まれる母性の細胞分化決定因子のはたらきによって、この因子を卵から受け継いだ細胞が分化することが知られている。このため 8 細胞期に単離した細胞からも、これらの組織は分化することができる。一方、中枢神経系の発生には、他の細胞からの誘導が必要であり、単離した細胞からは中枢神経系は生じない。筋肉は植物極側の細胞 (A4.1, B4.1) と動物極側の b4.2 細胞から生じるが、8 細胞期に細胞を単離すると、B4.1 からは筋肉が生じるが A4.1 と b4.2 からは生じないので、A4.1 と b4.2 からの筋肉分化には、他の細胞からの誘導が必要であると考えられる。

問 12) 【正解】 G 【部分点】 (配点の 5/10) H (配点の 3/10) A (配点の 1/10) I K

【解説】 季節的な長距離移動は、鳥類に多くみられる行動である。

図 1 にみられる飛行の傾向は、観測地点 X も観測地点 Y も昼間は少なく、夜間が多い傾向である。すなわち、多くの個体は、夜間に飛行し、昼間は休んでいる。観測地点 X と観測地点 Y は 400 km 離れている。もしノンストップで飛行した場合、飛行速度が時速 50 km であることを考えると、観測地点 X を通過して 8 時間後に観測地点 Y を通過することになる。このような傾向は、図 1 にはみられない。したがって、推測できるのは②と③である。

オアシスは渡り鳥が休息するのに適した場所である。昼間にオアシスの上空を通過する個体は少ないと考えられる。観測地点 X と観測地点 Y を比較すると、観測地点 X では圧倒的に昼間の飛行が少ない。したがって、(⑥と⑦)の一方を選ぶ問題形式であるので 観測地点 X と Y のうちオアシスがあるとすれば、観測地点 X である (⑥) と推測できる。

問 13) 【正解】 B 【部分点】 (配点の 3/10) A C D

【解説】 S 池について、実際に生息していた個体数は 100 であり、そのうちの半数の 50 個体に標識が付いている。しかし、再捕獲した 50 個体の中で、標識のある個体が 20 匹、標識のない個体が 30 匹であった。したがって、標識のある個体の捕獲率は標識のない個体の捕獲率の $\frac{2}{3}$ である。①が正解である。

捕獲率が $\frac{2}{3}$ であることを考慮すると、標識のある個体数を 1.5 倍して計算すれば、実際の個体数が推定できることになる。すなわち、 $s=50$ 、 $n=8 \times 1.5 + 42 = 54$ 、 $m=8 \times 1.5 = 12$ より、 $N=50 \times 54/12 = 225$ となる。

問 14) 【正解】 D 【部分点】 (配点の 5/10) B F (配点の 3/10) C (配点の 1/10) J

【解説】 成獣の死亡率を X, 新成獣の割合を Y とすると, 個体群の成長率は $(1-X)/(1-Y)$ で与えられる。3つの個体群の成長率を計算すると, 下表のようになる。X<Y のとき個体数は増加し, X>Y のとき個体数は減少する。

個体群	成獣の死亡率 (X)	新成獣の割合 (Y)	成長率	個体数の増減
P	8%	15%	1.08	8%増加
Q	19%	17%	0.98	2%減少
R	23%	9%	0.85	15%減少

このような数式を使わなくても, 次のように考えれば, 正解をえられる。個体群 R には 100 個体の成獣がいたとする。成獣の死亡率が 23%であることから, 1年後は 77 個体になることが期待される。また, 新成獣の割合が 9%であることから, 約 8 (=77×9/91) 個体が成獣に加わることになる。したがって, 1年後の成獣の個体数は約 85 である。すなわち, 個体数は 15%減少する。

成獣メスの 94%が毎年 1 頭の幼獣を出産するので, 出産直後の幼獣は成獣の 47%いたことになる。もし, 幼獣の死亡率が成獣の死亡率と等しいと, 新成獣の割合は $47/(47+100) \approx 32\%$ となることが期待される。観察された値ほどの個体群でもこれより小さいので, 幼獣の死亡率は成獣の死亡率より高いと推測される。

〈参考文献〉

Seip, D., & Cichowski, D. (1996). Population Ecology of Caribou in British Columbia. Rangifer, 16(4), 73-80.

問 15) 【正解】 I 【部分点】 (配点の 3/10) E J K (配点の 1/10) A F G L

【解説】 O 型の遺伝子型は ss であるので, O 型の子供は両親のそれぞれから対立遺伝子 s を受け取ったことになる。親から子供に対立遺伝子 s が伝わる確率は, 3つに分けて考える必要がある。

- (1) 親が O 型の場合: この確率が 1 であることは明らかである。
- (2) 親が S 型の場合: S 型の遺伝子型は SS と Ss である。遺伝子型 Ss の半分が対立遺伝子 s であるので, この確率は

$$\frac{1}{2} \times \frac{2pq}{p^2 + 2pq} = \frac{pq}{p(p + 2q)} = \frac{q}{p + 2q} = \frac{q}{(1 - q) + 2q} = \frac{q}{1 + q}$$

となる。

- (3) 親の表現型が不明な場合: この確率は, 集団の対立遺伝子 s の頻度と等しく, q である ($1/2 \times 2pq + q^2 = q$)。したがって, 子供の表現型が O 型である確率は次のようになる。

(ア) 不明×S 型: $q \times q / (1 + q) = q^2 / (1 + q)$

(イ) S 型×S 型: $q / (1 + q) \times q / (1 + q) = q^2 / (1 + q)^2$

子供が O 型であるとき, この子供は父親から対立遺伝子 s を受け取ったことになる。父親の遺伝子型が Ss のときは 1/2 の確率で, ss のときは 1 の確率で対立遺伝子 s は子供に伝わる。したがって父親が O 型である確率は,

$$\frac{1}{2} \times 2pq + q^2 = (p + q)q = q$$

となる。これは母親の表現型に依存せず, 母親の表現型が不明なときも同じ確率である。

問 16) 【正解】 D 【部分点】 (配点の 3/10) C

【解説】 遺伝子座 P と遺伝子座 S の間で組換えが起きるには、以下の 4 つの場合がある。それぞれの頻度を計算すると次のようになる。

(1) P-Q 間で組換えが起き、他の領域では起きない場合： $0.2 \times (1-0.2) \times (1-0.3) = 0.112$

(2) Q-R 間で組換えが起き、他の領域では起きない場合： $(1-0.2) \times 0.2 \times (1-0.3) = 0.112$

(3) R-S 間で組換えが起き、他の領域では起きない場合： $(1-0.2) \times (1-0.2) \times 0.3 = 0.192$

(4) 3 つの領域すべてで組換えが起きる場合： $0.2 \times 0.2 \times 0.3 = 0.012$

これらを合計すると $0.112 + 0.112 + 0.192 + 0.012 = 0.428$ となり、正解は 42.8% である。最後の項を忘れると $0.112 + 0.112 + 0.192 = 0.416$ となり、41.6% に部分点を与える。

問 17) 【正解】 G 【部分点】 (配点の 3/10) H

【解説】 ポイントは 2 つ。1 つは相同染色体と染色分体の違いを正しく理解しているか。もう 1 つは、減数第 1 分裂での染色体の行動様式を理解しているか。

染色体を構成する 2 つの染色分体の DNA/遺伝子は全く同じなので、選択肢の A~F は誤り。減数分裂第 1 分裂中期では、相同染色体間の組換えは終了しているが、両者は分離しないので、選択肢の J~L は誤り。残りの選択肢 G~I のうち、b と c の遺伝子座間で組換えがおこっているのは G のみ。選択肢 H は、上記の 2 つのポイントをクリアしているので、部分点を与える。

問 18) 【正解】 G 【部分点】 (配点の 3/10) C K (配点の 1/10) E H

【解説】 電気泳動では、1 本のバンドあるいは 3 本のバンドがみられる。このことはタンパク質が 2 量体であることを示している。すなわち、1 本のバンドはホモ接合であることを、3 本のバンドはヘテロ接合であることを示している。ヘテロ接合の場合 3 本のバンドがみられるが、両端の 2 本はホモ接合に、中央のバンドはヘテロ接合に対応している。

遺伝子座 S が常染色体上にあり、ハーディ・ワインベルグの法則が成り立っていると仮定してみる。遺伝子座 S には 2 つの対立遺伝子 (S_1 , S_2) があり、 S_1 遺伝子の頻度を 0.6 とする。(0.6 は S_1 遺伝子の頻度の推定値であり、 $(74+92/2)/200$ から求められる。) それぞれの遺伝子型について、この法則が成り立っていると仮定したときの期待数と観察数は以下のとおりである。

遺伝子型	S_1S_1	S_1S_2	S_2S_2
期待数	$200 \times 0.6^2 = 72$	$200 \times 2 \times 0.6 \times 0.4 = 96$	$200 \times 0.4^2 = 32$
観察数	74	92	34

観察数は期待数に近い値を示しており、この遺伝子座は常染色体上にあることが推測される。

一方、遺伝子座 R では、ヘテロ接合体の頻度は低く、常染色体上の遺伝子座におけるハーディ・ワインベルグ平衡にはなっていない。このことは、この遺伝子座は X 染色体上にあることを示唆している。

この問題を解くのに必ずしも必要ではないが、期待値を計算すると次のようになる。なお、 R_1 遺伝子の頻度を 0.41 [= $(57+50/2)/200$] としている。

遺伝子座 R が常染色体上にあると仮定した場合

遺伝子型	R_1R_1	R_1R_2	R_2R_2
期待数	$200 \times 0.41^2 = 33.6$	$200 \times 2 \times 0.41 \times 0.59 = 96.8$	$200 \times 0.59^2 = 69.6$
観察数	57	50	93

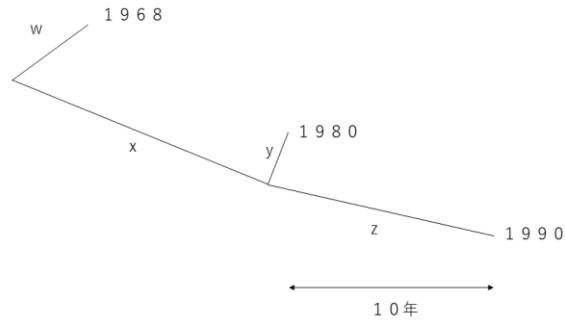
遺伝子座 R が X 染色体上にあると仮定した場合

遺伝子型	R_1R_1 または R_1	R_1R_2	R_2R_2 または R_2
期待数	$100 \times 0.41^2 + 100 \times 0.41 = 57.8$	$100 \times 2 \times 0.41 \times 0.59 = 48.4$	$100 \times 0.59^2 + 100 \times 0.59 = 93.8$
観察数	57	50	93

この結果は、この遺伝子座が X 染色体上にあることを示唆している。

問 19) 【正解】 D 【部分点】 (配点の 3/10) E F G

【解説】 ここでは 3 つの配列だけを考えるので、その系統関係は次のような形になる。



これらから各系統の枝で生じた塩基の変化数について

$$\begin{aligned} (w+x) + y &= 95 \\ (w+x) + z &= 141 \\ y + z &= 64 \end{aligned}$$

の関係にあることがわかる。これを解くと、 $w+x=86$ 、 $y=9$ 、 $z=55$ が求められる。進化の速度がほぼ一定と仮定できる場合、10 年間の違いで蓄積した変化の数は $z-y=46$ となる。(もちろん、この値は $141-95$ と同じ値となる。) このことから、1 塩基あたり 1 年あたりの塩基の変化の割合は

$$46/1701/10 = 0.00270\dots \text{で、おおよそ } 2.7 \times 10^{-3}$$

となる。表に示した値は、実際にヒトインフルエンザの塩基配列を比較してえられたものであり、ヒトのインフルエンザの突然変異率が高く毎年変化することが垣間みえる。

1968 年で採取されたウイルスは 1980 年や 1990 年に採取されたウイルスの直接の祖先ではないこと、1980 年で採取されたウイルスも 1990 年に採取されたウイルスの直接の祖先ではないことから、

$$\begin{aligned} 95/1701/(1980-1968) &= 0.00465\dots \\ 141/1701/(1990-1968) &= 0.00376\dots \\ 64/1701/(1990-1980) &= 0.00376\dots \\ (64+141+95)/1701/(12+10+22) &= 0.00400\dots \end{aligned}$$

などは正解とならない。

表紙

森狙仙 (1747-1821) は、おもに動物画を描き、その多くは猿の絵である。表紙は猿猴狙蜂図の一部である。森狙仙は猿の絵を描くために、山野に入り、猿を数年にわたり観察し続けたという話も伝わっている。