

## 第 1 問: 地球環境の変遷と生命の初期進化

### 【問題】

地球の 46 億年の歴史において、生物と地球環境は密接に相互作用してきた。初期の地球大気には遊離の酸素がほとんど存在しなかったが、約 27 億年前に光化学系 II を保持するシアノバクテリアが出現したことで、海洋中に酸素が放出され始めた。この酸素は海洋中の鉄イオンと反応し、大規模な縞状鉄鉱層を形成した。その後、大気中にも酸素が蓄積し、オゾン層が形成されると、生物の陸上進出を阻んでいた紫外線が遮断されることとなった。

一方、原生代末期には地球全体が氷に覆われる「全球凍結(スノーボールアース)」が複数回発生した。この極限環境の終結後、多細胞生物の劇的な多様化が起こり、エディアカラ生物群や、それに続くカンブリア紀の爆発的な進化へとつながった。これらの進化過程では、Hox 遺伝子群に代表される調節遺伝子の重複と再編が、複雑な体節構造の構築に寄与したと考えられている。

1. 初期のシアノバクテリアが縞状鉄鉱層を形成した際、なぜ酸素は即座に大気中に蓄積しなかったのか。その理由を化学的な観点から述べよ。
2. エディアカラ生物群に見られる「パンケーキ状」とも称される極めて扁平な体構造は、当時の低酸素環境において、生存のためにどのような利点があったと考えられるか。
3. カンブリア紀初頭に多くの動物門が一斉に出現した要因として、「眼」の誕生による生態系の変化が重視されている(光スイッチ説)。この説に基づき、視覚器の獲得が動物の形態進化(特に外骨格や遊泳能力)にどのような影響を与えたか、「捕食者」と「被食者」の関係性に触れて説明せよ。
4. 古生代シルル紀に出現したクックソニアなどの初期陸上植物は、重力に抗うために細胞壁にどのような物質を沈着させたか。
5. デボン紀に現れた「イクチオステガ」は、魚類と両生類の中間的な特徴を持つ。彼らが陸上移動を可能にした四肢の骨格構造は、魚類のどの部位に由来するか。
6. 中生代において、爬虫類が陸上・海洋・空中へと適応放散できた理由を、生殖(卵の構造)の観点から説明せよ。
7. 2020 年代の研究では、全球凍結中の火山活動による  $CO_2$  蓄積が温室効果を引き起こしたとされる。このプロセスが生物の「進化速度」に与えた影響について、集団の分断とボトルネック効果の観点から推論せよ。

---

## 第 2 問: 減数分裂における遺伝的変異と連鎖解析

### 【問題】

有性生殖の最大の利点は、減数分裂と受精を通じて個体間に膨大な遺伝的多様性を生み出すことにある。減数分裂第一分裂前期において、相同染色体が対合し、キアズマを形成することで染色体の乗換えが生じる。これにより、同一染色体上に存在する対立遺伝子群の組み合わせが再構成される。

モーガンらはショウジョウバエを用いた交配実験により、遺伝子が染色体上に直線的に配列していること、および近接した遺伝子ほど組換えが起こりにくいことを示した。しかし、実際のゲノム上には「組換えのホットスポット」が存在し、物理的距離と組換え価が必ずしも比例しない場合がある。また、連鎖している遺

伝子間でも、二重乗換えが発生することで組換え価が飽和し、最大 50%に近づく性質がある。

- 1.減数分裂において、二価染色体が形成されることの生物学的な意義を、染色体数の維持と遺伝的変異の創出の両面から述べよ。
- 2.ある植物において、第 1 染色体に遺伝子 A/a、第 2 染色体に B/b と D/d が存在する。B と D の間の組換え価が 12%である。遺伝子型 AaBbDd(B と D は相引)の個体を検定交雑した。得られた子のうち、表現型が[abd]となる確率を計算せよ。
- 3.問 2 の個体(AaBbDd)を自殖させた場合、[AbD]の表現型が現れる期待値を分数で答えよ。
- 4.三点交雑において、2 つの乗換えが独立に起こると仮定した場合の理論的な二重組換え期待値よりも、実際の観察値が低くなる「干渉」という現象が起こる。このメカニズムを簡潔に説明せよ。
- 5.減数分裂の際、姉妹染色分体間で乗換え(姉妹染色分体交換)が起きても、通常は遺伝的多様性の増大に寄与しない。その理由は何か。
- 6.2026 年現在の知見として、減数分裂特異的なタンパク質(SPO11 など)による DNA 二重鎖切断が組換えの起点となることが判明している。このプロセスが「相同組換え」を介して修復される際、なぜ遺伝情報の多様化が保証されるのか説明せよ。

---

### 第 3 問:適応進化のメカニズムと集団遺伝学

#### 【問題】

進化は、突然変異によって生じた新たな対立遺伝子が、自然選択や遺伝的浮動の影響下で集団内に広がるプロセスである。特に遺伝子重複は、タンパク質の機能を保持したまま、重複したコピーが変異を蓄積することを可能にし、多重遺伝子(マルチジーン)ファミリーを形成する。

集団遺伝学の基礎となるハーディー・ワインベルグの法則は、理想的な条件下での遺伝子頻度の不変性を説くが、現実の野生集団では常に進化要因が働いている。例えば、近年の気候変動により、特定の熱耐性遺伝子を持つ個体の適応度( $w$ )が相対的に高まる現象が各地で観察されている。また、中立進化説によれば、分子レベルでの進化の大部分は自然選択に対して中立な変異の蓄積であり、これは「分子時計」として分岐年代の推定に利用される。

- 1.遺伝子重複が起きた直後、重複した一方の遺伝子が機能を失い、発現しなくなったものを何というか。
- 2.ある植物の集団において、花の色を決定する遺伝子 R(赤)と r(白)があり、Rr は桃色となる。この集団では毎年、白い花(rr)の個体だけが特定の昆虫に食害され、種子を残せない。初期の遺伝子 R の頻度が 0.6 であるとき、1 世代後の R の頻度を求めよ。
- 3.鎌状赤血球症のヘテロ接合体(HbA/HbS)が、マラリア流行地域で生存に有利となる「超優性」を示すのはなぜか。
- 4.中立進化説において、機能的な制約が強い領域(タンパク質の活性部位など)よりも、制約が弱い領域(イントロンや偽遺伝子)の方が、分子レベルの進化速度が速くなる理由を「自然選択(負の選択)」の観点から説明せよ。
- 5.2 つの系統 A と B の共通祖先からの分岐年代を推定したい。A と B の特定のタンパク質のア

ミノ酸配列を比較したところ、100 アミノ酸あたり 4 箇所の相違があった。このタンパク質の置換速度を「100 万年あたり 0.1 箇所/100 アミノ酸」とすると、A と B が分岐したのは何万年前か。

6.タンパク質をコードする DNA 領域における「非同義置換( $K_a$ )」と「同義置換( $K_s$ )」の速度比  $K_a/K_s$  を調べることで、その遺伝子が受けている選択の種類を推定できる。 $K_a/K_s > 1$  となる場合、その遺伝子にはどんな選択が働いていると考えられるか。具体的な生物学的意義を含め説明せよ。

※非同義置換( $K_a$ ): 指定されるアミノ酸が変わらない置換。主にコドンの 3 つ目の置換

同義置換( $K_s$ ): 指定されるアミノ酸が変わる置換。

---

#### 第 4 問: 分子系統学とドメインの再編

##### 【問題】

かつて生物の分類は形態的特徴に基づいていたが、今日ではゲノム情報の比較による分子系統解析が主流となっている。1970 年代にウースらが 16S rRNA 配列を用いて提唱した 3 ドメイン説は、それまでの 5 界説を根底から覆した。さらに 2010 年代以降、アスガルド古細菌の発見により、真核生物の起源が古細菌ドメインの内部にあるとする「2 ドメイン説(エオサイト説)」が有力視されるようになっている。

生物の系統関係を解明する上で、水平伝播(HGT)は解析を困難にする要因となるが、同時に真核細胞の誕生(細胞内共生)のような劇的な進化のトリガーともなってきた。分類学の基礎である二名法は、こうした動的な進化の歴史を固定的な名称で記述するが、分子系統学は常にその枠組みを更新し続けている。

1. リンネが確立した二名法において、種を特定するために属名の後に記述される語を何というか。
2. 分子系統解析において、16S rRNA や 18S rRNA が広く用いられる理由は、この分子が生物にとってどのような機能的・構造的制約を持っているからか。
3. 細菌ドメインに特有の細胞壁成分であり、古細菌ドメインには存在しない物質は何か。
4. 3 ドメイン説において、古細菌と真核生物が細菌よりも近縁であるとされる根拠として、DNA のパッキング(巻き付き)に関わるタンパク質の共通性を挙げよ。
5. 分子時計の計算において、特定の遺伝子の進化速度が生物群によって異なる「不均一性」が生じる要因として、世代交代の期間(世代時間)の差がどのように影響するか述べよ。
6. クジラ類が、外形が似ている魚類ではなく、偶蹄類(カバなど)と近縁であることを示す分子的な証拠として、DNA 配列中の特定の反復配列(SINE/LINE)の挿入位置が一致することが挙げられる。なぜこの手法が、塩基配列の比較よりも系統の「決定打」となり得るのか。
7. 3 ドメイン説における「細菌」と「古細菌」を区別する細胞膜の化学的特徴を、結合様式(エステルかエーテルか)と疎水性鎖の構造(直鎖か分岐鎖か)の観点から対比して述べよ。
8. 分子時計の進化速度を推定する際、100 万年あたりのアミノ酸置換数が 0.1 である分子を用い、種 A と種 B の間で 4% の差異がある場合、分岐年代は何万年前となるか。