

## 細胞の始まり

### 1. 原核細胞はどのように生まれたのか

原核生物には核膜はなく環状 DNA が細胞内に存在している。

もともと RNA はその立体構造から、自らが**遺伝情報**をもち、反応の手助けをする**酵素**の働きをもっていた。この二つの働きによって RNA は自分と同じ情報をもった RNA（自分のコピー）を作る競争を繰り返し、原始地球を支配していたと考えられる。これを **RNA world** という。やがて RNA は、安定していてコピーが楽な **DNA** に遺伝情報の保持を、**アミノ酸**（によって構成されるタンパク質）に酵素の役割を受け渡すことで、分業による効率化をはかった。RNA 自身は情報を運ぶ役割を担うようになり、**DNA→RNA→アミノ酸**の流れが形成された。この流れを独り占めするために**細胞膜**で区画を作ったのが細胞の始まりと言われている。

### 2. 遺伝子の水平移動

細胞は、死んだ他のバクテリアの DNA を拾って取り込み、さまざまな遺伝子をもつようになっていった。これを**遺伝子の水平移動**という。

たとえば、遺伝子の水平移動によって 2 種の遺伝子（1 型 DNA・2 型 DNA）をもったシアノバクテリアは、今までは利用できなかった光エネルギーを利用して**光合成**を始め、硫化水素を糖の合成に用いていたが、**水**を利用できるようになった。これは、1 型・2 型 DNA の遺伝情報から得られる 2 種類のタンパク質を連動させることにより可能になったと考えられている。

### 3. 環境の変化による発達

原核細胞が増加すると、ありふれていたアミノ酸は減少し、厳しい環境の中で生き抜いていく必要が生まれた。そこで細胞は**代謝系**を発達させるため体を大きくしていった。しかし、細胞を大きくしていくと、細胞の容積に対する表面積の割合が小さくなっていく。この問題については、**細胞内膜系（細胞小器官）**の分化により解決された。

### 4. 真核細胞の出現

シアノバクテリアの光合成活動によって、大量の酸素が原始大気中に排出された。大気中の蓄積酸素がある程度以上高濃度になると、細胞の生命を脅かすようになる。酸素は毒性の強い気体であり、細胞内の代謝反応を攪乱するからである。そのため原核細胞はこの難を逃れるため、以下の 3 通りの方法をとったと考えられる。

1. 膜系を発達させ、酸素を組み込んだ代謝法、**酸素呼吸法**を獲得し、後に真核細胞に取り込まれることになるミトコンドリアの原型となる。
2. 海底の堆積物中にもぐりこみ、無酸素環境で生き続ける。現在では**古細菌**としてわずかに生き残っている。
3. 仲間の何匹かが互いに融合し細胞を大きくして、酸素が体の奥に届かないようにする。膜のやわらかさを利用し、DNA 付着点を細胞膜ごと細胞内に取り込んで核膜を形成、DNA を内部に保持するようになる。その酸素呼吸法を獲得した細胞との**細胞内共生**をはかる。**真核細胞**の誕生である。

### 5. 共生

こうして取り込まれていったのが**ミトコンドリア**や**葉緑体**である。ミトコンドリアは好気性のバクテリアで、嫌気性の細胞が取り込むことにより、その細胞は酸素を利用した呼吸ができるようになった。また、葉緑体（シアノバクテリア）を取り込んで共生を始めたものは、光合成により酸素

を排出するようになった。酸素呼吸と光合成は逆反応であり、細胞は自身が排出した酸素を呼吸に利用できる。このような生物（植物）によって 100 万分の 1 の濃度でしかなかった大気中の酸素が徐々に増加して現在と同じ 20%ほどになり、**オゾン層**が形成された。太陽からの紫外線がオゾン層に遮蔽され、地表は生物にとって住みやすい環境になった。

## 遺伝情報の発現

### 1. DNA の構造と性質

DNA は RNA と違って **2 重らせん**構造をした**デオキシリボヌクレオチド**であり、**リン酸・デオキシリボース・塩基**の 1 単位（ヌクレオチド）が多数つながったものである。塩基は **A**（アデニン）と **T**（チミン）、**G**（グアニン）と **C**（シトシン）がそれぞれ対応して結合する仕組みになっている。これを**相補性**という。相補性により DNA は方向が決まっている。DNA の複製はさまざまな種類の酵素（例：ヘリカーゼ、DNA ポリメラーゼ、リガーゼなど）によって**半保存的**に複製される。

### 2. mRNA への転写

DNA の情報は核内で **mRNA**（messenger RNA）に転写される。高等な生物の DNA には**イントロン**（無意味な情報）と**エクソン**（重要な情報）が書き込まれていて、転写時にイントロンを除去する作業が行われる。この作業を**オルターナティブスプライシング**という。オルターナティブスプライシングでは、イントロンが完全に除去されないこともあり、ひとつの遺伝情報から異なったタンパク質を作り出す可能性を内包している。これにより環境の変化に対する順応性が高められている。一方、イントロンを完全に除去するスプライシングもあり、これを**コンスティテューテッドスプライシング**という。いずれにせよ、核膜という空間的（かつ時間的）余裕があるからこそスプライシングは可能である。原核細胞には核膜は存在せず、その DNA はイントロンを含んでいない。原核細胞ではひとつの設計図からひとつの生成物しか作れないので、真核細胞のような多様性がない。

### 3. タンパク質の合成

塩基は三つの組み合わせ（**コドン**）で特定の**アミノ酸**と対応している。核の外に出た mRNA が**リボソーム**で情報を読み取られる。コドンと結合する**アンチコドン**をもった **tRNA**（transfer RNA）が対応するアミノ酸をリボソーム上に運ぶ。酵素により次々とアミノ酸が結合されてタンパク質を合成する。遺伝情報にはタンパク質が働くべき場所が明確に示されている。合成されたタンパク質は、自身のもつ**シグナルペプチド**によって示された場所で働く。

## 細胞小器官と役割

### 1. 核・核膜

核膜は袋同士が融合してできている。本質的には細胞膜と同等で、核内部を「内」、核膜内部を「外」に区分している。DNA は**核ラミナ**という物質で核内につながれている。核膜は DNA を細胞骨格から守り、DNA 保存の空間的余裕、mRNA 形成時にスプライシングする時間的余裕を確保し

ている。細胞分裂時の核を見ればわかるように、核膜及び核内構造はダイナミックな動的やわらかさをもっている。

## 2. リボソーム

**リボソーム**はタンパク質顆粒及び **rRNA** (ribosome RNA) からなる構造である。**ER** (Endoplasmic reticulum：小胞体) 上に降りてきた mRNA と、アミノ酸を運んできた tRNA を対応させるタンパク質合成工場で働く。ふだん顆粒と rRNA は分離しているが、稼動時には合体する。リボソームはすべての生物がもっているのもので、それらを比較することで系統的類縁関係を類推できる。

## 3. ER (小胞体)

**ER** には、**Rough ER** (粗面小胞体) と **Smooth ER** (滑面小胞体) の 2 種類が存在している。前者はリボソームをもち、タンパク質を合成しそれに糖を付加させる役割をもっている。後者はリボソームをもたず、脂質を代謝して膜をつくる役割をしている。

## 4. ゴルジ器官

**ゴルジ器官**は、Rough ER から輸送されてきたタンパク質の糖の修飾 (付加・除去による調節) を行い、シグナルペプチドに記されたとおりに最終機能地点へ発送する。入口 (cis face) と出口、輸出口 (trans face) がはっきりしている。

## 5. ライソゾーム

**ライソゾーム**は小胞内に**加水分解酵素**を保持した構造である。細胞外由来の物質、及び細胞内の老朽化した小器官を分解処理する働きがある。小胞膜は細胞膜と同質であり、酵素のある小胞内部を細胞「外」とし明確に区分している。加水分解酵素の最適 pH は 5 程度で、pH7 である細胞内外ではあまり機能しない。そのためライソゾームには、pH5 に保つため水素イオンを取り入れる機能がある。

核内 mRNA (転写) → 核膜孔 → ER (翻訳・合成・糖付加) → ゴルジ (糖装飾) → タンパク質の最終機能地点 → (老廃として) ライソゾームという一連の流れが、細胞を形作る基本となっている。

## 6. ミトコンドリア・色素体

細胞内共生由来の小器官として、糖を酸素で分解し 1 グルコース → 36ATP を得る**ミトコンドリア**や、光エネルギーによって糖をつくり出す**色素体 (葉緑体)**が存在する。これらは他の小器官と違って 2 重膜構造になっている。このことから、これらが共生由来の小器官であるということがわかる。

## 7. 細胞骨格

細胞骨格には**微小管・中間径フィラメント・アクチンフィラメント**の 3 種類が存在する。微小管は**チューブリン**というタンパク質が連なった直径 25nm ほどの管である。細胞の**中心体**から周辺部に向かって多数伸びていて、細胞構造を維持している。微小管が中心に 2 対、周囲に 9 対連なった構造を**タブレット**という。その例に鞭毛構造がある。微小管を構成するタンパク質がずれることで、タブレットは波を打つよう動くことができる。中間径フィラメントは直径 10nm ほどの管である。皮膚のケラチン繊維や、核ラミナを構成している。アクチンフィラメントは**アクチン**からなる直径 7nm ほどの管である。アクチンは筋肉を構成する主要なタンパク質で、ミオシンと結合し強い力を生み出す。3 種類の細胞骨格により、細胞の形・運動性の維持が行われている。

## 8. 細胞膜

親水性部分と排水性部分が組み合わさってできた**リン脂質**の海に、膜に結合した、あるいは膜を貫通したタンパク質が浮かんでいる。このような細胞膜構造を**波動モザイクモデル**という。細胞膜の内側には細胞骨格を含んだ**細胞質ゾル**がある。細胞膜の外側には**細胞外マトリックス**（糸状構造がからまっている）や糖がついている。細胞膜にはイオン移動のための機能（ナトリウム・カリウムポンプ）をもったタンパク質などが浮かんでいる。

細胞膜は内外の区別がはっきりなされている。細胞内の小器官膜は細胞膜と同質で、たとえばライソゾーム「内」は細胞質「外」であり、細胞質ゾル「内」の環境とはっきり区別される。サイズが大きくなり表面積割合の減った細胞が小器官を発達させた理由は、ここにある。

## 多細胞生物への道

### 1. ボルボックス（多細胞への道）

クラミドナスと呼ばれる単細胞生物が、同じ向きに四つ結合したものをゴニウムという。さらに三次元的に結合したパンドリナ、数が増えるにつれユードリナ、プレドリナ、ボルボックスと名称を変え、種そのものも変わる。クラミドモナスはボルボックスになる進化の過程で細胞間の連絡を行い、細胞ごとに仕事を分業するようになる。そして分業化のなかで、体細胞と生殖細胞を分化させ独特な無性生殖をうみだした。原核生物には明確な「死」は存在しないが、体細胞には「死」が存在する。多細胞体制への過程で、生物は「生殖」「死」を獲得した。

### 2. 個体の維持のための仕組み

細胞を分化させると、それぞれの細胞で連絡を取る機能が必要となる。そのため隣どうしの細胞は細胞膜を通じて、遠隔の細胞どうしであっても**シグナル分子**を通じて細胞間コミュニケーションを行う。また、細胞分裂を行うため**細胞周期**が存在する。細胞周期とは細胞分裂サイクルのことで、**M 期**（前期・中期・後期・終期）→**G1 期**→**S 期**→**G2 期**→**M 期**のようになっている。G1～G2 期を間期とよぶ。M 期は分裂を目に見えて行う時期であり、G1 期は細胞が本来の仕事を行う時期、S 期は核内で DNA の複製を行う時期、G2 期は分裂に備え細胞骨格系の複製を行う時期とされている。周期内には 3 つのチェックポイントが存在する。特に G1 期終了時のポイントが重要で、細胞の数が十分に増え分化が完了している場合に、分裂サイクルを止め **G0 期**に入る働きがある。この機能が損なわれたのが**癌細胞**であり、とどまることなく分裂を続けやがてはホストを死にいたらしめる。

## 生物の進化と環境

### 1. 原始地球の環境

過去の有機物などの組成は岩石を調べることで類推できる。それによると、原始地球には水・アンモニア・水素・メタンのような小さな分子しか存在しなかったことがわかる。ミラー（1953）はそのような大気成分に対し熱と強い紫外線（あるいは火花放電）を与えることにより、アミノ酸、糖、ヌクレオシドなどの細胞基礎となる低分子有機物が生成されることを実証した。これらの低分子有機物が自律的に集まって高分子有機物を形成し、生命を生み出したと思われる。これを**化学進**

化という。原始地球に比べ、生物が現れてからの地球には多種多様な有機物が存在する。アミノ酸や糖、各種ハイドロカーボン類は比較的早い時期の存在が確認されている。一方、色素や飽和脂肪酸、多糖類のようなポリマーは比較的新しい。地球上の有機物の組成も生物の進化とともに多様化してきたことがわかる。

## 2. 遺伝子の進化

進化は必ずしも進歩と一致しない。遺伝子の進化を短期的に見れば、**点変異**によって生じた変化のうち、わずかな優位なものが**選択**され、大半の不利を生むものは消えていくというものである。長期的に見れば、重複や欠失によって遺伝子が大規模な再編成をへて、新しい組み合わせが生まれていくというものである。

## 3. ヘモグロビンの変化

生物の進化に伴い**分子進化**した結果、現在さまざまなタイプのヘモグロビンが存在する。ヒトはこれらの様々な遺伝子を複数もち、体の成長に伴う状態変化によって機能の違うヘモグロビンを使い分けている。たとえばヒトは、ヘモグロビンがすぐに酸素をはなさないようにするため、そのような性質をもつ $\alpha(2)\gamma(2)$ というヘモグロビンを胎児期に用いて、出生後その必要がなくなると、すぐに酸素を離すことができる $\alpha(2)\beta(2)$ を用いている。

## 4. シトクローム C

**シトクローム C**とは電子伝達系のタンパク質で、ほぼ全ての生物がもっている。生物種によって少しずつ違うアミノ酸配列の解析から、分子進化過程を推定することができる。

## 5. ATPase の細胞内分布と細胞共生説

**ATPase**とは、ATPを分解してエネルギーを取り出す酵素のことである。細胞内のATPase分布を調べると、古細菌型ATPaseは液胞やライソゾームの中に存在し、真正細菌型ATPaseはミトコンドリアや葉緑体といったところに存在していることがわかる。このことから、古細菌（古細菌という名前であるが、こちらのほうが動物の体細胞に近く、真正細菌よりも進化した存在である）に真正細菌が共生したのではないかと考えることができる。

## 6. 動物の進化

ペンド紀の海中に動物は30種類ほどしか存在せず、みな酸素効率のよい扁平な体をしていた。ところが植物の進化によって酸素濃度が高くなったために温暖化現象や浅海の出現がみられ、カンブリア紀には10000種にもなった。この急激な種数激増のことを**カンブリア大爆発**という。この時期に、最古の脊索動物である**ピカイア**が生まれた。ピカイアはその後ナメクジウオ、ヤツメウナギを経て脊椎動物に進化していったと考えられている。

## 7. 植物の進化

二酸化炭素と光を利用してエネルギーを得る細菌から、水を利用して酸素を発生するタイプの光合成細菌が生まれた。クロロフィル、フィコブリン等、色素の分子進化がおこり、細胞内共生をすることになった。光合成活動の結果、大気中に多量の酸素が蓄積した。その後オゾン層形成を経て、植物の陸上進出が始まった。

## 8. 花の進化

陸上植物は分業化を行った。光を受けやすい葉で光合成を行い、大気中の窒素は直接吸収できな

いので根から水や窒素を吸収するようになった。最初の陸上植物は**マツバラン**である。花は、虫媒を行うため、昆虫へのアピールとして葉が発達したものである。

## 9. 生物の種類と絶滅

絶滅の結果生き残った種が現存種である。地殻変動や惑星の衝突などによって、地球上ではたびたび**大絶滅**が起こってきた。現存種は今まで地球上に現れた全種のうち 1000 分の 1 ほどしかない。

## 個体の維持

### 1. 組織

同一の機能と構造を備えた細胞集団を**組織**という。組織は細胞及び細胞間物質（細胞外マトリックス）からなる。動物細胞では、上皮組織・支持組織（結合組織）・筋組織・神経組織などがある。生物個体は細胞→組織→器官→器官系→個体のように整理することができる。

### 2. 呼吸

哺乳類は呼吸効率上昇ために、**肺胞**という器官をつくり肺の表面積を広げている。また、運動時に多く酸素を供給できるようにするために、酸素運搬物質のヘモグロ빈は酸素分圧が低いところや、pH の小さい（二酸化炭素が増加して酸性になっている）ところで酸素をよく離すようになっている。これを**ボーア効果**という。また、運動量の多い鳥類の肺は一方向に循環する仕組みであり、より効率よく酸素を供給できるようになっている。

### 3. 内部恒常性

外部環境は、昼夜や四季によって大きく変化する。この環境の変化に対して同調するタイプの**一致動物**と、環境の変化に対して内部環境を変化させないように調節する**調節動物**が存在する。一致動物は環境が適応できる範囲を超えてしまうとすぐに死んでしまう。

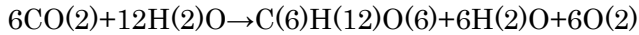
### 4. 代謝系に関する環境への適応

冬や夜の気温の低下に対して動物はどのようにして対応しているのか。あるものは解剖学的に上手く体温調節の仕組みを作っている。これを**構造適応**とよぶ。冬シャク（シャクガ）や水鳥、鯨、マグロなどがこれにあたる。たとえば、冬シャクは夏の蛾と比べると構造がだいぶ違っている。夏の蛾（スズメガ）は熱くなった血液を冷ますための構造をもっているが、冬の蛾（シャクガ）は胸の羽を動かす筋肉運動で血液を温め、体を循環して冷たくなった血液と温まった血液を触れ合わせて血液を温める空気袋構造をもっている。昆虫は開放血管系をとり、代謝のための温度適応をしている。また、窒素廃棄物の排泄についてみると、生物は**物質適応**している。水中で生活する生物はアンモニアのまま排泄し、陸上の動物には尿素（液体）にする動物（哺乳類や小さな卵の動物）や尿酸（個体）にする動物（鳥類や殻のある大きな卵の動物）がいる。両生類の動物は変態によって陸上に上がるときに、尿素合成に必要な酵素が作られるようになる。ほかに、代謝システムを一時的に休ませる適応方法もある。ハチドリは体温維持のためのエネルギー補給が追いつかないため、毎晩冬眠状態になる。動物の生活環境によって、水分の排出をできるだけ少なくしている生物も存在する。カンガルーラットは 1 日でほとんど水を体外に出さない。

## 光合成

### 1. 葉緑体と光合成システム

光合成とは光エネルギーを利用してグルコースを合成する生体反応のことである。



二酸化炭素から水を利用して糖を作り、副産物として酸素を出す。これは光合成の収支を大きく見たものである。細かく見ると、光エネルギーを化学エネルギーに変える**明反応**と、その化学エネルギーを利用して糖を合成する**暗反応**に分けられる。明反応は**チラコイド**重層である**グラナ**で行われ、暗反応は**ストロマ**（葉緑体のチラコイド以外の部分）で行われている。

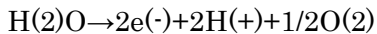
### 2. 葉緑素（クロロフィル）の構造

クロロフィルは **Mg** 原子を中心とした炭素（C）と窒素（N）の複素環構造（ポルフィリンリング）をとる。クロロフィル a とクロロフィル b の違いは一箇所が、**CH**か**CHO** であるかの違いだけしかない。

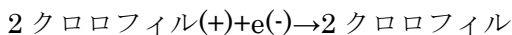
### 3. 明反応

明反応はシステムの自由エネルギーを増加させる。グラナで光エネルギーを利用し水を用いて **ATP** と **NADPH** を作り出し、副産物として**酸素**を放出している。

これをミクロ的に見てみると、以下のようなになる。光エネルギーによってとられた電子を戻すために水から電子を奪う。



クロロフィルに電子を渡す。



こうしてプロトン（水素イオン）の勾配を形成し、水素イオンが高いところから低いところへ通るときに **ATP** が生成され、**NADPH** をつくる。

### 4. 暗反応

暗反応は自由エネルギーを介してグルコースを合成する。ストロマにおいて行われ、**カルビン回路**で **ATP** と **NADPH** を用いて二酸化炭素を固定し糖を精製、**ADP** と **NADP**を出す。

### 5. 光呼吸

光合成と呼吸の合わさった現象を**光呼吸**という。光の強いところでは多く呼吸するため、酸素を多く必要とする。すると、**ルビスコ**（**Rubisco**:暗反応で二酸化炭素をカルビン回路に取り込むところで働く酵素）に酸素が付きやすくなってしまい、光合成の効率が悪くなってしまう。つまり、酸素分圧の高いところでは光合成の効率が悪くなる。そのため植物は、酸素分圧が高いと **ATP** やグルコースを作らなくなる。これを**ワールブルグ効果**という。

### 6. C3 植物と C4 植物の違いと CAM 植物

**C3 植物**は主に温帯、**C4 植物**は主に高温乾燥地帯に生息している。これらは環境の違いからカルビン回路の仕組みが異なっている。C3 植物については前述したような仕組みになっているが、C4 植物の C4 細胞はルビスコによる光合成の効率低下を避けるために、**PEP カルボキシラーゼ**（酸素分圧が高く二酸化炭素分圧が低くても、二酸化炭素を取り入れやすい酵素）を利用している。そし

て、C4 植物は維管束のまわりに**維管束鞘細胞**という細胞がある。C3 植物は葉肉細胞において明反応・暗反応を行うのに対し、C4 植物は葉肉細胞で明反応、維管束鞘細胞で暗反応を行う。また暗反応では二酸化炭素を固定して C(3)→C(4)の化合物を作って糖を生成する。光が強いところでは、C4 植物の方が効率よく、ある程度弱くなると C3 植物のほうが効率よい。C4 植物は二酸化炭素の獲得において C3 植物より優れている。

一方、**CAM 植物**は夜に気孔を開いて二酸化炭素を取り入れ、昼に気孔を閉じて水が逃げないようにして夜間取り込んだ二酸化炭素をカルビン回路で固定する。C4 植物は 2 種類の細胞を用い空間的に制御しているのに対し、CAM 植物は 1 種類の細胞を用い時間的に制御している。

## 生物の進化

### 1. 生物界

生物界を分類する方法はさまざまである。大別する方法としては、まず**原核生物**と**真核生物**に分ける方法がある。これらの違いは核膜の有無にある。核膜の有無により、遺伝子の発現方法に若干の違いが起こる。

ほかに、**5 界 (5 kingdom)** という区分の仕方がある。これは、真核生物をさらに**原生生物・植物・菌類・動物**に分類したものである。植物と菌類には細胞壁が存在し、葉緑体は植物のみに存在する。ほかに**3 領域 (3 domain)** という方法もある。これは、**バクテリア・古細菌・ユーカリア**に分ける方法である。これらのうち、バクテリアと古細菌は原核生物である。いずれにせよ、生物は単系統であり、もともと 1 匹のバクテリアから始まった。

### 2. 生物の種

生物の種類は、カンブリアの大絶滅や恐竜の絶滅などの大絶滅を繰り返しながら増加している。

生物学的「種」は、「内部では相互に交配し生殖能力のある子孫をつくることができるが、その外部とは生殖的に隔離されている自然集団の集合体」と定義できる。生殖的な隔離とは、空間・時間・行動的に隔離されていたり、配偶子構造から受精できなかつたり、受精後の生存能がなかつたりする場合をさす。たとえば、サンショウウオについて、地理的に離れたところに生活するものが別の種になった**リング・スピーシーズ**の実例が発見されている。

生物の進化の中で新しい種が生まれてきた。しかしその中間となる化石（**ミッシングリンク**）が発見されていない。このことから、生物が少しずつ変化しているのではなく、断続的に進化をしているのではないかという考察ができる。（ただし化石として見つかっていないだけという可能性もある。たとえば、キリンの首について、通常生物と現在のキリンの中間長である首をもつ化石が見つかっている。）

### 3. 進化学の歴史

進化学の歴史は、リンネによって分類学が大成され**二命名法**が確立したことに始まる。地質学者キュヴィエは、発見した化石が下方にあるほど原始的な構造をしていることに気づいた。しかし、当時は基督教の影響が大きく、進化という考えにはいたらなかった。

ハットンとラエルは、地質の変化を調べ、地球の環境・地形が恒常的なものでないことを発見した。プフオンは、地球は聖書によって記されている（6000 年）よりも古く、生物はある一つの原型から多様に変化していったと主張した。



ラマルクが生物は進化するという“進化”の理論を打ち立てた。しかし、当時の“進化”理論は特定の器官をより多く使うことでそれが進化し、獲得形質を遺伝していくという理論であった。この説は現在否定されている。その後、スペンサーは自然環境の変化と生物の変化の関係を明らかにした。

ビーグル号で世界を回ったダーウィンによって、自然にあったものが生き残る＝**自然選択と適応の理論**が打ち立てられ、その後ウォレスによって進化の要因としての**自然選択説**が立てられた。

#### 4. 進化の証拠 (1)

- 4.1. 野生のカラスを品種改良することによって様々な野菜になる。
- 4.2. 飛行機で殺虫剤をまいて害虫を殺しても、殺虫剤に耐えられたもの（環境に適応できたもの）が生き残る。

#### 5. 進化の証拠 (2)

比較解剖学の観点から見ると、腕から手にかけての骨の数は人・ネコ・クジラ・コウモリで変わらず、胚時期に共通の起源をもつ**相同構造**である。発生の段階での鰓弓は、魚ではエラになり、ヒトでは下顎・中耳・のど・舌の一部になる。これに対して、発生で違う起源をもつが同じ働きをするものを**相似構造**という。たとえば鳥の翼と昆虫の翅などがある。

#### 6. 進化の証拠 (3)

分子生物学上の証拠として、ヘモグロビンのアミノ酸配列を比較すると、遠い類縁ほど違いが大きくなっている。

#### 7. 集団遺伝学からみた遺伝

外部からの圧力がなければ、対立遺伝子の遺伝子頻度は世代とともに変化しない。このハーディ・ワインベルクの法則により生物は進化しないように考えられる。しかし、生物の数は有限であり、ある特定の遺伝子だけがなくなってしまう可能性がある。これを**ボトルネック (瓶首) 効果**という。たとえば、シエラネヴァダ山脈において、植物は高度の低いところで背の高いものが有利であり、高度の高いところで背の低いものが有利になる。そのため、高度の高いところでは背の低い遺伝形質が残り、高度の低いところでは背の高い遺伝形質が残る。結果、同じ種であっても、場所によってサイズが違う。また、高度の低いところの植物を高度の高いところに人為的に移動しても、背が低くなるわけではない。ある種の部分集団において、その地域の環境に適応した結果として生じる段階的進化を、**クライン**（傾き）という。この例は、遺伝子流動の停止が新しいクライン形成につながった例である。ダーウィンフィンチのくちばしを例にとると、乾燥し不作な年では、より大きい果実を食べるため、大きなくちばしをもつようになる。

ほかにも、マラリアに対して耐性のある鎌形赤血球の遺伝子がマラリアの多いアフリカでは残っている。この耐性遺伝子を二つもつ（ホモ）と生存に不利になってしまうが、一つだけもつ（ヘテロ）ことで生存に有利になるからである。野鶏のオスに着目すると、目立つものは大きな生物に狙われやすいが生殖に有利（もてる）であるので子孫を多く残すことができ、目立つものが残るという淘汰関係がある。

## 1. 遺伝子変異の形成と維持

遺伝子変異は突然変異、有性生殖による性的組み換え、遺伝子流（配偶子の交換・拡散）によって形成される。表現型と遺伝子型の違いにより、環境によりあった形質を発現している個体が生き残る。これを**二倍体**による遺伝子変異の維持という。またホモ接合よりヘテロ接合のほうがより優位である**ヘテロ接合優位**による変異維持や、変異体が同頻度で生き残れる環境において起こる**頻度依存選択**による変異維持がある。これらを**平衡多価**（バランスよく残るの意）という。

## 2. メンデルの法則・表現型

メンデルは、**純系**を用いて遺伝の性質について調べた。

### 2.1. 分離の法則

減数分裂時に1対の対立遺伝子は別々の配偶子に分離する。そのため遺伝形質の表現型は、優性：劣性＝3：1となる。対立遺伝子は同じ遺伝子座にある。

### 2.2. 独立の法則

対立遺伝子が何対かあるとき、同じ染色体上にない限りそれらは独立に行動する。

### 2.3. 不完全優性

### 2.4. 複対立遺伝子（血液型など）

### 2.5. 環境に依存した表現型も存在する（例：アジサイの花の色）

### 2.6. 検定交雑：親の遺伝子型を知るため、劣性ホモの遺伝子をもつものどうしを掛け合わせる。優性ホモの場合は優性形質のみが、優性形質のあらわれたヘテロの場合は、半分が優性形質、半分が劣性形質の表現型をもつ子孫がうまれる。

## 3. 伴性遺伝

ハエのオスは性染色体としてXとYを、メスはXとXをもっている。赤目オスと白目オスの子供のうちオスは必ず赤目になる。これは、目の色を決める遺伝子はXの性染色体上にあることからくる。オスが生まれるためにはオスの親からY染色体をもらわなければならない。よって、子供の子孫はメスの赤目の遺伝子のみをもつためである。このように、性染色体上にほかの遺伝子がのっていて遺伝することを**伴性遺伝**という。伴性遺伝の例として、血友病がある。

## 4. 連鎖と組み換え

独立の法則について考える。複数の種類の対立遺伝子と同じ染色体上にある場合、独立の法則は成り立たない。そこで二つの遺伝形質は完全な関係＝**連鎖**をもって遺伝すると考えられるが、実際は理論と違った遺伝形質の発現が起こる。これは、減数分裂時に遺伝情報の**組み換え**が行われているからである。これによって、遺伝情報の多様化をうんでいる。ところで、この組み換えがどのくらい起こっているのかを

**組み換え率** = 理論と違うものの和 / 総数

で求める。染色体上の位置によって組み換えの起こりやすさが違うので、組み換え率を求めることにより染色体上における遺伝子の相対的位置を推測することができる。これにより、**遺伝子地図**を描くことができるようになる。

## 5. 細胞分裂

### 5.1. 体細胞分裂

細胞の周期は大きく二つに分けることができる。一つ目は、細胞分裂をするための準備期の**間期**である。この期間に、DNAの合成準備をおこなう**G1期**、DNAを合成して2倍にする**S期**、分裂の準備の**G2期**がある。そして、二つ目は細胞分裂をする**M期**である。M期は**前期・中期・後期・終期**に分けられる。前期には、核膜・核小体が消えて染色糸があらわれる。（動物では中心体が両極へ移動する。）中期には染色体があらわれて赤道面に並ぶ。（動物では星状体が両極に存在する。）後期には染色分体が紡錘系によって極へ移動する。そして終期に再び核膜と核小体が現れて、紡錘系が消える。植物は細胞板によって細胞が分裂し、動物ではくびれて分裂する。

### 5.2. 減数分裂

この分裂は、基本的に体細胞分裂と同じことをするが、一つの細胞が四つに分裂して、染色体数  $n$  の細胞を作る。第一分裂で相同染色体が対合して二価染色体になり、 $2n$  の細胞（染色体数は同じものが二つ）になる。そして第二分裂で  $n$  の細胞になる。

## 6. 遺伝情報の担い手 DNA

### 6.1. 肺炎双球菌をマウスに投与する実験

肺炎双球菌の**S型**は病原性のある被膜をもっているが、**R型**はその被膜をもっていない。**S型**をマウスに打ち込むとその病原性によってマウスは死ぬが、**R型**ではマウスは死なない。そこで、煮沸して殺した**S型**をマウスに打ち込んでみると、マウスは死ななかった。また煮沸して殺した**S型**と何もしていない**R型**を打ち込むと、マウスは死んだ。このことから、**R型**が**S型**に**形質転換**したのではないかと考えられた。

次に、形質転換の原因が調べられた。マウスに何もしていない**S型・R型**を打ち込むと死ぬ。また、被膜を取り除いた**S型**と**R型**を打ち込んでも死んだ。しかし、**R型**と、DNAを取り除いた**S型**を打ち込んでもマウスは死ななかった。こうして、形質転換の原因がDNAであることが明らかになった。

### 6.2. DNAの働き

形質転換の原因がDNAであることがわかったが、では実際に、遺伝にどのようにかかわっているのかについて、**T (2) ファージ**を用いた実験で示された。このウィルス（単独では生物の特徴＝生殖を示さず、他の生物に進入しその代謝系を利用し増殖する）を大腸菌に感染させ、大腸菌のDNAとタンパク質を利用しウィルスを増殖させた。このとき、タンパク質・DNAに含まれる**S・P**をすべて放射性同位体で置き換えて追跡することでDNAの働きを確かめ、DNAを基にして親と同じものを複製・増殖していることがわかった。

## 7. DNAの構造と複製

### 7.1. DNAの構造

DNAの成分を計測したところ、**AとT**、**GとC**の塩基がそれぞれ等量ずつ存在していることが明らかになった。このことから、**A-T・G-C**という組み合わせでDNAが存在していることが推測された。その後ワトソンとクリック（1953）によって、DNAの**2重らせん構造**が提唱された。

### 7.2. DNAの複製方法

DNAの複製方法について、さまざまな仮説が唱えられた。メセルソンとスタール（1958）は**N**の同位体の質量差を利用して解明する実験を行った。まず、大腸菌（増殖スピードが速いので実験に適している）を質量数15の**N**の培地で増殖させ、菌のDNAがすべて質量数15の**N**で構成されるようにした（**P世代**）。その後、質量数14の**N**の培地で菌を増殖させた（**F1世代**、**F2世代**）。

代...)。そして、各世代の DNA を遠心分離して重さによる濃度勾配をつくった。すると、P 世代ではすべて重い層にあつまり、F1 世代ではすべてが中間の重さの層、F2 世代以降は中間の層と軽い層に分かれ、代を経るたびに軽い層の割合が増えていった。このことから、DNA 複製は**半保存的複製**であることが判明した。

## 8. 塩基配列

ある DNA 鎖上の塩基配列を遺伝暗号のポジ（陽画）とするならば、対を成す DNA 鎖の塩基配列はネガ（陰画）である。そのネガから転写された mRNA の塩基配列はポジになる。DNA 上で T（チミン）だったものは RNA 上で **U**（ウラシル）に置き換わっており、それぞれのコドンに特定のアミノ酸、あるいは開始・終止暗号が対応している。

## 遺伝子工学

### 1. 遺伝子工学概要

バクテリアは自らの DNA であるバクテリアクロモゾームと、ファージ由来の小環状 DNA **プラスミド**をもっている。遺伝子工学の典型的手法は以下のようなものである。まず、必要な DNA をもった細胞から必要な DNA を取り出す。そしてその DNA をバクテリアのプラスミドに組み込み、バクテリア内に戻す。それを培養し、そこから必要な効果を取り出す。DNA の切断には**制限酵素**を用いる。これにより特定の塩基配列をもった DNA のみを切り取ることができる。また接着には **DNA リガーゼ**を用いる。このような酵素を用いた切り張りが、遺伝子工学の基本となっている。

### 2. 遺伝子ライブラリ

遺伝子工学の遺伝子ライブラリは 2 種類ある。ひとつは **cDNA**(complementary DNA)ライブラリである。スプライシングされ、イントロンが除去された mRNA と取り出し、**逆転写酵素**にかけてイントロンのない 1 本鎖 DNA を得ることで、ライブラリとして保存する。もうひとつは**ゲノムライブラリ**であり、DNA を直接取り出し保存する。保存は、バクテリア内のプラスミドや、ファージに組み込まれてなされる。

### 3. PCR 法

**PCR** (The Polymerase Chain Reaction) とは DNA の倍増方法のひとつである。高温でも機能する**耐熱性ポリメラーゼ**を用いて、1 サイクル：ディネイチャー（1 本鎖化）→アニリング（プライマー付加）→エクステンション（DNA 合成）とし倍増させる。10 サイクル行うのに 2, 3 分ほどしかかからず、効率がよい。

### 4. Sanger 法

**Sanger 法**は DNA 塩基配列決定法である。dd（ジデオキシヌクレオチド：DNA ポリメラーゼに接合し働きを止める）を用いて DNA をいろいろな長さに切断し、それらを比較配列することにより元の配列を推測する。

## 生殖細胞

### 1. 生殖細胞の起源

生殖細胞（原始生殖細胞）は予定生殖巣と別の場所で発生の早い段階に形成される。この場所の細胞にはミトコンドリアの周囲に特殊な RNA がついており、それらは**生殖細胞決定因子**とよばれる。哺乳類の場合、配偶子は生殖管の中で受精能を獲得する。

### 2. 哺乳類の受精

精子と卵子が受精するとき、一つの卵子に複数の精子が受精して  $3n$  以上になるのを防ぐ必要がある。そのため卵子は、精子一つの受精により他の精子が受精できないようにする仕組みをもっている。精子の先体が卵細胞に到達すると**先体反応**を起こし、直後に卵子の周囲が硬くなる。その後卵細胞内の**表層粒**が外部に分泌され、受精 30 秒後には外膜と反応して**受精膜**を形成する。

### 3. 細胞系譜

受精卵が分裂し個体を形成する中で、どの細胞がどこに向かいどのように分化するかは決められている。線虫は体細胞が合計で 1000 個程度なので細胞系譜を容易に調べることができる。分化した細胞の中には、**遠位細胞**という、他の細胞をコントロールしているものもある。

### 4. プログラム細胞死

**アポトーシス**（プログラム細胞死）は、遺伝子プログラムにより自殺用のタンパク質がつくられ、不要となった細胞が自ら死ぬことである。たとえば使用頻度の低い神経細胞は、使うことで筋肉から与えられる物質の供給が断たれ、自殺プログラムによって自殺する。

### 5. 発生の 3 段階

発生は 3 段階に分類することができる。第 1 段階は、**細胞分裂**を繰り返し、細胞数が増え始める段階である。第 2 段階は体軸をもつようになり、部域化、**形態形成**の段階である。第 3 段階は**細胞分化**が始まり、各領域の専門化が行われる段階である。

### 6. パターン形成

生体内のどこに、どのような細胞を分化させるかということを**パターン形成**という。各細胞は、**ホメオティック遺伝子**によって、生体内における機能部位が決められている。もし、このパターン形成が乱れると生体の成立・機能に異常が現れる。ホメオティック遺伝子は生物によって異なるが、遺伝子の順番が、体の方向（頭→胴体→尾）に対応している。これは動物に共通な事柄で、ホメオティック遺伝子の**コリニアリティー**という。このことより系統進化を類推することができる。

### 7. 分化した細胞の全能性

植物の細胞は全能性が高く、挿し木などでクローンを作りやすい。動物の細胞にも全能性はある。オタマジャクシの腸細胞の核を、紫外線で核を破壊した卵に移植すると、卵が孵化してカエルになった。このことから、遺伝情報はすべての細胞に残されていることがわかる。

乳腺細胞を低栄養培地で培養して脱分化し、核のない卵細胞に電気パルスで融合して胚をつくった。それを母羊の子宮に移植して、クローン羊のドリーが誕生した。このような技術を利用している再生医工学において、**ES 細胞**による拒否反応のない臓器移植などが期待されている。

## 生態系

### 1. クロロフィルの分布

人工衛星から地球上のクロロフィルの分布を観測することによって、地域別の植物分布を鳥瞰することができる。熱帯においては、森が広がっているが、栄養を植物に吸い取られてしまうため、土地がやせている。地中海性気候の乾燥地域（チャパラーム）では山火事が多発するため、周辺地域に生息している生物群が火事適応している。このように、ある環境に特定の広がりをもった特定の生物が生息しているとき、生物を含めたその地域全体のことを**バイオーム**という。

### 2. K 戦略と $\gamma$ 戦略

動物には **K 戦略**で個体数を増やす種と、 **$\gamma$  戦略**で個体数を増やす種がいる。K 戦略で増えるものは社会性をもち、安定な環境において、環境限界による**環境抵抗**を受けて最大環境収容力程度まで増殖する。一方  $\gamma$  戦略で増えるものは、社会性をもたず、一時的に環境がよいと **J-Shape** を描いて環境限界を超えるまで増殖する。しかしその後集団崩壊をおこし激減していく。このような戦略によって増殖するものは、不安定な環境において適している。

### 3. 住み分け

異種間、異個体間の競争を回避するため、生物はそれぞれの細分化された地域=**ニッチ**に住み分けて生活していることがある。また、異種間同士でエサの食べ分けをしていることがある。

### 4. 個体密度・個体数の変動・食物連鎖

一般に、生物は個体密度が増加すると繁殖スピードは遅くなる。しかしそれとは無関係に、個体密度の変化量が季節のみに依存するものも存在している。

生物の個体数は変動を続けている。結果、捕食者、被捕食者の間でバランスが保たれている。ある海において、捕食者であるヒトデをすべて捕獲してしまったら、環境のバランスが崩れた例が報告されている。捕食者がいなくなることで被捕食者が増加することが考えられるが、実際は被捕食者まで減少した。これは、ヒトデが環境の整備をしていたからと考えられる。

食物連鎖において各階層の個体数は、1つ上の階層に上がるたびに約 10 分の 1 になる。

### 5. 島の大きさと種の多様性

ガラパゴス諸島においての調査結果より、島の大きさとその島に生息する生物種数は相関関係にあることが明らかになった。

### 6. 生態系

相互作用している生物群及びそれらを取り巻く物理的環境を合わせた単位を**生態系**という。生態系では、**生産者**、**第一次消費者**、**高次消費者**、**分解者**間のエネルギーサイクルが存在する。また生態系において、生物に必須な元素は循環する。

### 7. 循環

#### 7.1. 水の循環

水は降雨・蒸発によって大きく循環している。地球上では、岩石圏に蓄えられている水量が最も多く、次いで海洋圏が多い。ヒトは地球上の水の 10000 分の 1 を使っている。

#### 7.2. 炭素の循環

炭素は大気中に主に二酸化炭素として、海洋中に炭酸塩として存在している。海洋のほうのはる

かに多い。そして、大気中の炭素を植物が固定し糖としてエネルギーを蓄えている。そのエネルギーを運ぶものとして生産者・捕食者・分解者があり、最終的に循環して大気中に戻る。

### 7.3. 窒素の循環

窒素はタンパク質や核酸といった生物の構造に重要な元素である。しかし、生産者である植物は大気中に多く存在している窒素を利用することはできない。大気中の窒素は窒素固定細菌が硝酸塩に固定することではじめて植物が使えるようになる。そして植物は、根から水に溶かした形で窒素を利用する。捕食者はアンモニア・尿酸・尿素といった形で窒素を排泄し、分解者の手によって、植物がふたたび吸収できる形になり循環する。

## 生物の行動

### 1. 生物行動

生物行動を決定するものは遺伝由来か学習由来かがしばしば問題になる。実際は、その両方が存在している。学習由来の例として、地蜂が巣を円形パターンとして記憶する実験例がある。遺伝由来の例として、本能的に「目の下が赤い」パターンを攻撃する淡水魚の例がある。またアヒルの実験において、生まれたとき、最初に視界に入った動くものを親と思う**刷り込み**現象が確認されている。

### 2. 行動における遺伝と学習

フィッシャーズバードは、紙を長く切って啜めるか、短く切って後羽に刺すか、このどちらかの行動をとる。これは遺伝的な性質である。しかし、中くらいに切った場合は後羽にさせないので、あきらめて啜めるか、放置する。これは、行動の決定において学習と遺伝が混ざった状態であり、どちらのものと断言できない。地蜂は巣に帰るとき、巣の周りを石で円形に囲っておくと「その中に巣がある」と学習する。そのため、石の円を移動させ違う形で囲うと、円形のある場所へ行ってしまう。水草で巣を作る淡水魚の中には、目より下が赤いものを攻撃するという性質をもつものがある。これは対象の形には関係なく、本能的な行動である。ある鳥はさえずりパターンが多いほど、繁殖に成功しやすいが、このさえずりのパターンは学習によって増えていく。野外で育てたもの、隔離したもの、耳栓をしたもののパターン数を比べてみると、確実に学習ができる野外のものが、明らかに数が多かった。

### 3. 縄張り

動物は縄張りを確保することによって、無駄なエネルギーを使わずに行動できる空間を作っている。縄張りの作り方はさまざまである。例えばネコは、縄張り内の各所に匂いづけすることによって、縄張り主の情報を示している。

### 4. 同種間コミュニケーション

ミツバチ社会では、ダンスによって餌場の場所を知らせる同種間交信が知られている。ダンスの頻度（8の字のサイクル数）で餌場までの距離を示し、ダンスの角度で方向を示す。

### 5. 同種間化学交信

同種間化学交信には**フェロモン**が用いられる。フェロモンは低分子で多くの種類があり、非常に微量でよく効く。また揮発性なので、用が済むとすぐなくなり、シグナルとして効率よく機能する

ようになっている。主な例として、女王蜂の女王物質（第一女王が生きている限り、そのフェロモンにより第二、第三女王の卵巣が発達しない）、アリの道しるべフェロモンなどがある。生物体の構造はフェロモンを放出しやすく、また受け取りやすいようになっている。

#### 6. 異種間化学交信

同種間と同じようにフェロモンが用いられる。例を挙げると、葉を食べる蝶の幼虫と、食べられることで傷口から寄生蜂（蝶に寄生）を呼び寄せるフェロモンを出す植物の三角関係などがある。

#### 7. ヒト

ヒトはサルから進化した。サルはリスから進化した。

10 万年前アフリカの大地溝帯東側において、地殻変動で森を失い、草原を二足歩行し始めたサルがヒトの起源とされている。二足歩行によって手が自由になり、また、喉が広がり言葉の使用が可能になった。このことで脳の発達が促され、サル→猿人→原人→旧人→新人と進化した。たった 10 万年の間に世界中に広がったことは、ヒトの大きな特徴である。（ポリネシアを中心とした太平洋地域には 3000～1000 年前と比較的最近に広がった。）ほかの生物と違い、ヒトは他種を支配する能力（農耕・家畜）を獲得した。近年では遺伝子組み換え技術によって自然をも支配しようとしているが、大きな危険性をはらんでいる。産業革命以降ヒトの個体数は激増し、2050 年には 100 億人に達するといわれている。また近年ヒトは大型化している。

#### 8. ヒトの Activity

ヒトの活動により、生物種数に偏りが生じている。ヒトはその社会発展とともに、おもに哺乳類を次々と絶滅させていった。またヒトの活動の結果、二酸化炭素の急激な増加が**地球温暖化**をもたらしている。

#### 9. 生命系

生物圏をマクロな視点から見る概念として、**生命系**という概念が提唱されている。生命系では空間的広がりと時間的系統を二つの主軸とする。生命系で考えると、ヒトは 38 億年分の DNA を背負っている。