

進化学教育シンポジウム：報告

2006年8月18日（於 大阪市立自然史博物館講堂）参加者160名

係 府立茨木高校 広瀬祐司（文責）

日本生物教育会近畿ブロック主催、日本進化学会共催、大阪市立自然史博物館共催で、表記のシンポジウムが開催された。近畿ブロックとしては、昨年12月に開催した生態学教育シンポジウムにつづく二度目の主催行事となった。講演者とその講演趣旨をここに報告する。

進化基本の「き」

一進化のメカニズムとトンデモ進化理論一

中井咲織 立命館宇治中学校・高等学校

はじめに

すべての生物は、たった1種類の原始生物から進化して生じた可能性が高い。その根拠には、すべての生物が遺伝物質として核酸（DNA・RNA）をもつこと、すべての生物のアミノ酸が光学異性体のL型であることなどがある。高校教科書には、RNAにもとづく全生物の系統関係図の記載もある。現在の生物多様性や環境と生物の関わりを論じるには、進化について知る必要がある。高校「生物」で学ぶ事象はすべて進化によってもたらされ、ヒトも進化の結果出現した。また「進化」は生徒が最も興味をもつ分野の一つである。

しかしながら、進化の授業は次のような教科書記載に従って行われることが多い。すなわち、1) 進化の証拠（日本では「進化」現象自体を疑う人は少ないにもかかわらず）、2) 進化の諸説を解説：用不用説・自然選択説・突然変異説・隔離説・総合説・中立説など（これらがそれぞれ相容れない説であるかのように、正誤並列に取り上げられる傾向があり、しかもここで進化の授業が終わる場合も多い）、3) 進化のしくみ（これが、まだよくわかっていないことのように教えられることもある）。このような順序と内容では、正しく進化を理解することは難しい。

そこで、進化の授業は「進化のしくみ」を中心にすえよう、と提言する。進化のメカニズムの基本はとてもシンプルで、高校で教える程度の進化

のメカニズムはすでに理論的に確立されており、1～2時間で教えることが可能である。ぜひすべての生徒に進化の知識を身につけてほしい。それには、これまでの授業の進行とは違った、1) 進化のしくみ、2) さまざまな進化現象、という順序で授業を行うことを提案する。さまざまな進化現象とは、「進化の証拠」として記載されている、適応・適応放散・収斂・共進化・性選択・擬態・定向的な進化などを指す。この進化学習のポイントは、1) 進化の定義を明確にすること、2) 諸説の羅列という従来のスタイルから脱却すること、3) 学習の中心を「突然変異」・「自然選択」・「遺伝的浮動」による進化のしくみとする、以上の三点である。

進化の定義

進化とは、祖先とは違う子孫が生じることである。正確には、「祖先集団の遺伝的構成とは異なる遺伝的構成をもつ子孫集団ができること」である。

しかし、世間で進化と呼ばれている現象の中には、生物学的な進化の要件を満たさないものがある。たとえば、ポケットモンスターの進化は、生物学的には同一個体の成長にともなう変態であり、進化ではない。また、二軍の鈴木一郎が大リーグで大活躍するイチローになったのは進化ではなく、成長といえる。このように、ある個体が生まれてからおこる変化は、進化ではない。

具体的で身近な進化の例に、インフルエンザウィルスの進化がある。これは昨年流行したインフルエンザウィルスと今年流行のウィルスが異なり、昨年のウィルスに対して製造されたワクチンが効かないという現象である。これは、昨年流行したインフルエンザウィルスが、ワクチンや罹患によるヒトの免疫獲得などによってその繁殖が抑えられる中、子孫の中に異なるタイプのウィルスが登場し、免疫を持たないヒトに再び感染し、流行を起こすことによって起こる。このように、生活史の短いものでは短時間で進化が起こる。

進化のメカニズム

1) 突然変異

これは親とちがう性質をもつ子がうまれることであり、遺伝子のコピーミスによっておこる。厳密には、ある親個体の配偶子に起こった突然変異が、次世代（子孫）に引き継がれることによって生じる。突然変異の結果さまざまな子が生まれ、集団に変異が生じる。

2) 自然選択

変異のある集団の中から、環境に不利な性質を持つ個体を取りのぞかれる現象が自然選択である。結果として、環境に有利な性質をもつものが生き残り、環境への適応がおこる。「適応」という現象は自然選択による進化の結果である。

自然選択は、実に多様な適応（進化）をもたらす。(1) 相互作用を行う生物で、互いが選択圧となって起こる「共進化」（花とチョウ、貝とそれを食べるカニなど）、(2) 大量絶滅を生き残った生物が、空いたニッチに適応して起こる「適応放散」、(3) 同じニッチをしめる生物には同じ選択圧がかかるため、似たような形質が進化する「収斂」、(4) 一方向的な選択圧が一方への進化をもたらす「定向的進化」、(5) クジャクの羽やオオツノシカの角のような、生存には一見邪魔で適応的でないように見える形質でも、「異性の選り好み」という選択圧によって進化が起こる「性選択」。その他に、擬態・ベルグマンの法則・アレンの法則・島に生物の矮小化・大陸の生物の大型化なども自然選択による進化の結果（適応）である。

このように、自然選択によって様々な生物が進化するが、このような単純な要因で多様な生物が誕生することを疑問視する人も少なくない。しかし、人為的に形質を進化させた「品種」の例を見れば、遺伝的多様性に選択を加えるだけで、様々な形質の生物に進化させられるということが容易に理解できるだろう。例えば、イヌの多様な品種は、オオカミにヒトが選択を加えて進化させたものである。ダックスフントはアナグマを穴から追い出すために足の短いイヌを選択した結果であり、ブルドックは牛と戦わせるために、大きな牙や角につかれても傷つきにくい、たるんだ皮フを選択した結果である。

3) 遺伝的浮動

ライト効果ともいう、偶然の振れ(確率的な過程)によって、親世代と次世代の集団中で遺伝的構成が変化する現象である。ここでいう偶然とは、天災や事故、たまたま配偶者が見つからずに繁殖できない、たまたま多産だった、などの出来事を指す。遺伝的浮動は、集団のサイズが小さいほど大きくはたらく、その結果環境に有利でも不利でもない形質が進化する。ヒトのABO式血液型の頻度の人種によって異なるのは、遺伝的浮動の結果だと考えられている。また、ジンバブエで見られる足の指が二本になる、二本指症候群も生存上の不利はなく遺伝的浮動によって進化したと考えられる。

ちなみに、教科書に記載されている「隔離説」は、自然選択と遺伝的浮動が複合して作用する場合である。隔離された環境が異なれば、ことなる自然選択が起こる。隔離された集団が小さければ、遺伝的浮動による進化が起こりやすい。隔離はすべての教科書で取り上げられているが、必須事項ではない。

進化の傾向

1) 環境が変化するとき、進化が起こりやすい。これは環境が変化すると、いままでとは異なる選択圧がかかるために、異なる性質が選択され進化するからである。

2) 小さな生物ほど早く進化が起こる。小さな生物は大きな生物に比べて寿命が短く、世代交代が短時間で起こる。その結果、一定時間に生まれる子の数が多くなるため、突然変異体が多く生じることになる。

3) 大きな生物は絶滅しやすい。寿命が長いと、一定時間で生じる子の数が少なく、突然変異個体が少なくなるので集団が有する変異が小さい。そのため新たな環境変化が起こったときに生き残る確率がより小さくなる。この一般的傾向に照らし合わせると、ヒトは絶滅しやすいといえる。それは、ヒトの集団中の変異が小さいためである。「ちがいがあっていいことだ！」

進化のメカニズムに対する批判に対して

1) 「首の長さが中くらいのキリンが発見されていない」（中間化石が発見されていない）

脊椎動物の化石記録は不完全であり、進化過程の研究には使えない。脊椎動物以外ならば、中間化石と見なせる化石記録は豊富にある。

2)「自然選択だけで様々な生物が持つ機能性を獲得できるわけではない」

短時間の人為選択ですら、既存の生物からさまざまな多様性のある品種を作り出せる。自然選択ならなおのこと可能である。

3)「生存に不利な形質が存在することを説明できない」(ヒトはビタミンCを合成できないなど)

ビタミンCが合成できなくても、生存に不利ではない。有利でも不利でもない形質は遺伝的浮動によって取り除かれることがある。

4)「漠然とであるが、とにかく間違いだ！」

ダーウィニズムとも言われる進化のメカニズムに対する批判の多くは、進化生物学に対する無理解に起因している。

教科書に見られるおかしな記述

「進化は種そのものの変化である」(数研出版)、「自然選択が働く個体は、突然変異体である」(第一学習社)、「集団内の遺伝子構成が変化する小進化は、中立的な遺伝子突然変異が集団内に蓄積して起こる」(第一学習社)、「進化の直接的な証拠である、化石発掘の努力が続けられている」(実教出版)、「化石から採取された DNA の一部から、DNA の塩基配列を読みとり、現存する生物と比較することもできるようになっている」(実教出版)、「現在では進化の主体を個体とする説、遺伝子とする説、さらには種とする説などがあり、それぞれ研究が進められている」(実教出版)、このような間違った記述が現行の教科書に見られる。

『生物I』で進化を教える

池田博明 神奈川県立西湘高等学校

はじめに

進化についてその重要性に気付いたきっかけは、1994年にコスタリカに旅行したときに、ネイチュア・ツアー・ガイドの解説が必ず進化的観点から行われたことである。例えばオオハシの嘴が種子食・果実食に対する適応であり、ハチドリがヘリコニアの花と共進化したこと等々。このような進化的な自然解説は、日本ではまったく行われていない視点で新鮮だった。現行の学習指導要領では進化は生物Ⅱに配置されて、それを選択履修する生徒は大変少ない。そこで『生物I』の内容で、「進化」学習とリンクさせている単元と、その視点を紹介する。

細胞とその構造に関連して

動物細胞と植物細胞の比較は教科書の最初に出てくる項目であるが、そこにはなぜこのような共通性と差異があるかは記述されていない。しかし、細胞共生説で説明すれば一目瞭然である。ミトコンドリアや葉緑体の増殖能力や独自に環状DNAをもつことも納得のいく形で説明できる。

無核の赤血球は哺乳類の特徴である。温血動物で酸素運搬機能に特殊化した結果である。哺乳類の赤血球は他の動物の血球に比べて小さく、それ自身の代謝活性が低く、エネルギーをあまり消費しない。細い毛細血管を通して体のすみずみに、酸素を運ぶことが可能なのである。

細胞の単元を終えると生体構成物質を教えている。「生物I」の教科書では糖やアミノ酸、タンパク質を記述することは学習指導内容の範囲を逸脱するというので記述できない。しかし、「家庭基礎」や「家庭一般」では食物栄養でこれらは化学の履修とは無関係に記述され教えられている。同じ高校一年生に教える内容として、奇妙な扱いである。

細胞構成物質のなかで、タンパク質を構成するアミノ酸は20種類であり、必須アミノ酸が8種類であることを授業で扱う。ところでなぜこれらのアミノ酸が必須アミノ酸なのだろうか。それはこれらの8種が自然環境から得やすいアミノ酸だからである。つまり、体内で合成する必要が無いので、合成する遺伝子をなくすように進化してしまったのだ。

植物の器官と体制に関連して

イチョウの葉の二叉状葉脈を見ながら、大葉説で考察する。最初の陸上植物は小葉をもっていた。後期デボン紀から前期石炭紀の大気中の二酸化炭素濃度が低下したとき、それまでの小葉では二酸化炭素吸収が困難になり、大葉が進化したようである。大葉化は寒冷に対する適応であったらしい。

花は葉が茎頂に集まって進化したものと考察されている。原始的な花の構造は花卉等がらせん状に付いているが、やがて花床が短縮してがく片や花卉が同じ軸に付く。そして、次第に放射相称花から左右相称花へと進化していく。このように花形を進化させた要因は花粉を運ぶ昆虫である。花卉にある紋様は昆虫に蜜のありかを教える蜜標である。ハチやハエに花粉を運んでもらう適応として、進化した花ほど左右相称花で合弁花、下向きといった特徴が出て来る。

また、被子植物のめしべの心皮数は、そのめしべの起源となった葉の下図を推測するのに役立つ。実際に教室に持参したリンゴやミカンといった果実を横断してみると、心皮数が理解できるものである。シロイヌナズナのゲノム解析によって葉の遺伝子が突然変異すると花卉になったり、がく片になったり、めしべができたりということが判明してきた。

動物の組織・器官に関連して

ホールステッドの仮説によると、硬骨は海水中に過剰に存在するカルシウムの排出装置として進化したという。無セキツイ動物では炭酸カルシウムとして排出され、それらは殻となって身を守るのに役立ったが、炭酸カルシウムは溶けにくいいためそのカルシウムを再利用することは困難である。しかし、硬骨の化合物はリン酸カルシウムである。このリン酸カルシウムはカルシウムを貯蔵する装置としてだけでなく、不足時には溶出させてカルシウムを補うこともできるのである。

「耳小骨の進化」も面白い。ウシの頭骨から取った耳小骨や内耳標本も所持しているので、これらを見せながら物語を話すことができる。耳小骨の進化で、つち骨ときぬた骨は哺乳類の特徴だが、それは哺乳類が夜行生活に移行してから、夜の闇の中で《空気中の》小さな音も聞き分けるように適応・進化したためである。

適応や進化を教えるのに最適の材料は、脊椎動物の歯や顎の特徴であろう。動物は食物に適応した歯と顎を持つ。例えば、無顎魚類、プランクトン食の魚、肉食の魚の比較。植食の鳥、果実食の鳥、昆虫食の鳥、肉食の鳥の嘴のちがひ。植食の哺乳類、肉食の哺乳類の違いなど。グールドが監修した優れた進化の図版本「The Book of Life」の翻訳が待たれる。ただし、現在の『生物I』では顎や歯を扱う適当な単元がない。

動物の眼の構造に関連して

イカの眼とヒトの眼は同じカメラ眼とはいいいながら相同ではなく、相似器官であるとみなされてきた。網膜の構造が違い、イカの網膜は視細胞が前を向いており視神経は個別の視細胞から眼球の外にでるので盲点がない。脊椎動物の網膜は視細胞が後ろを向いており、視神経は個別の視細胞から出たものが盲点で束になって眼球の外にでる、つまり盲点には視細胞がない。ヒトの視細胞が反転している理由は脳の発生と関連している。無脊椎動物の網膜は外胚葉の表面の視葉の外側に眼のレンズが出来ているのだが、脊椎動物では外胚葉が反転したところで視葉が出来ているからである。

実際に手軽に入手して見せることの出きる材料として、ホタテガイの眼がある。スチームホタテとして40個で200円程度で売っているホタテガイの、外套膜にある茶褐色の点が、レンズを持った眼である。百個近い眼がある。この点からは先細ピンセットで簡単にレンズが取り出せる。ただし、ホタテのレンズは小さいので、観察には実体顕微鏡かルーペが必要である。マグロやイカの眼も良い観察材料である。脊椎動物の眼の観察にはブタの眼を使用する。これは安価で（一個20円程度）たくさん用意できる。ウシの眼と異なり、小さく虹色の反射層がないが実験観察には問題がない。大きさもヒトの眼程度なので、生徒の心理的抵抗も少ない。

これらのすぐれた機能と構造を持つ動物の眼は、進化論者ダーウィンを悩ませた。進化は徐々に進むと考えたダーウィンは「眼のような構造が徐々に出来るのはおかしいではないか。未完成の眼にはなんの適応的な意義もない」という批判にうまく答えることが出来なかったのである。なぜすぐ

れた眼があるのか？ この問いに19世紀までは、神による「創造説」で答えていた。つまりすぐれた眼は「神のデザインであり不変である」とする。これに対して、19世紀以降の「進化説」では「種は変化する」と考える。ダーウィンは「種の起源」（1859）を著し、集団内に変異があることに注目した。自然環境による選択が、適者を生存させると考えた（自然選択説）。

オプシンの多様性に関連して

突然変異による進化を説明するのに題材として、ロドプシン・グループがある。ロドプシンは発色団とオプシントタンパク質が結合した色素蛋白質である。脊椎動物の錐体細胞には三種類あり、それぞれ青色オプシン、緑色オプシン、赤色オプシンが含まれている。これら三種の細胞が光を吸収した結果、脳の視覚野で色を識別している。

魚類、両生類、鳥類、爬虫類、哺乳類と色覚オプシンを比較すると、夜行性の哺乳類はいったん色覚を失ったことがわかる。そして、色覚はサルで復活する。新世界ザルは色覚オプシンを二種類しか持っておらず、不十分である。しかし、ヒトになると、三種の色覚オプシンを持つようになる。分子の差異を調べてみると、オプシントタンパク質のアミノ酸がたった1個置換することで、緑色オプシンは赤色オプシンになることが分かった（122番目をグルタミンからイソロイシンへ置換）。また、同様に122番目をグルタミン酸に置換するとロドプシンに変わる。赤色オプシン遺伝子と緑色オプシン遺伝子はX染色体上にある。（両遺伝子は遺伝子重複によって進化した）。青色オプシン遺伝子は起源が古いと考察されている。

さらに最近では、レンズのクリスタリンについても、興味深いことが分かっている。クリスタリンには α 、 β 、 γ という共通の部分があるが、その他に種特異的なクリスタリンがある。アヒル・クリスタリンを調査したところ、なんと乳酸脱水素酵素とまったく同じであった。酵素のような機能タンパク質と、クリスタリンのような構造タンパク質が同種であるというのは驚くべきことであった。しかし、これは一例ではない。他にも酵素と同じクリスタリンが発見されている。

進化の基本ロジック：自然選択理論と中立理論

嶋田正和

東京大学・総合文化研究科広域システム科学系

今日の話の構成

- 1) 進化とは何か？－生物進化をめぐる誤解
小進化と大進化
- 2) 進化生物学の2つの理論的支柱
- 3) 自然選択の基本原則－3つの条件
- 4) 自然選択の実例－4つ
- 5) 補足：キリンの首をどう理解するか？
- 6) 中立説とは何か？
- 7) 中立説を支持する事例－3つ
- 8) 中学・高校の教科書は進化をどう教えているか？

進化とは何か？・・・生物進化をめぐる誤解

日常では、いろんな場面で「進化」という言葉が使われる。それに共通するニュアンスは、「今までみたこともないほどの大きな発展の現れ」である。だから一般人はごく自然に、生物進化は「何かの進歩・発展をもたらす」と思ってしまう。今までみたこともない、新しい生物種が出現することが進化だと思ってしまう。

一般人が「進化」といえば、アンモナイトや恐竜を思い浮かべるだろう。しかし、恐竜やアンモナイトの栄枯盛衰を眺めても、進化のしくみはわからない。重要なのは遺伝をベースに進化の仕組みを理解させることである。集団中に毎世代生じる遺伝的構成（遺伝子頻度）の変化が、最もミクロな時間スケールの進化である。これを土台にして、進化の基本ロジックを教えることが大切である。現代進化生物学の理論的支柱は2つある。1) 突然変異に自然選択が作用して方向性のある選択が起こり、その結果として適応進化が起こる、という総合説。2) 突然変異に遺伝的浮動と純化淘汰が作用して分子進化が起こる、という中立説である。

自然選択

- 1) 個体間に変異がある、2) その変異が遺伝する、3) 変異に応じて生存や繁殖に有利・不利がある、この3つの条件さえ揃えば、自立的に進む。

このように、現代の自然選択論は機械論的であり、古典的な目的論（～のために進化した）による解釈などは不要である。

自然選択は、個体の繁殖・生死を通じて、集団中の遺伝子頻度が変化する過程であるので、それが作用する単位は個体、もっと厳密には個々の遺伝子である。集団や種は複製の単位ではないため、ふつう自然選択の作用する単位にはならない。適応とは、生物のもつ形態や生理的・生態的性質が、その生息環境で生活するのに適した状態であることを指す。そして、自然選択は、進化的な適応をもたらす唯一のしくみである。突然変異はすでにできあがった形質を崩し、遺伝的浮動は適応とは無関係に形質を置き換える。

自然選択の事例

1) オオシモフリエダシャクの工業暗化

工業化が進んだイギリスの都市近郊では、木の枝につく白っぽい地衣類が減って、黒っぽい木の地肌が炉露出する。オオシモフリエダシャクというガの体色は1遺伝子座で決まり、CCとCcは黒化型、ccは野生型である。ドーセットの林の木には地衣類が着いており、バーミンガムではついていない。標識したガを一定期間後に再捕獲すると、バーミンガムでは黒化型の再捕獲率が高く、ドーセットでは野生型の再捕獲率が高かった。バーミンガムでは木の黒い地肌が保護色となって黒化型が鳥の捕食を免れる。一方、ドーセットでは林には地衣類が繁茂しているため、野生型の方が保護色となって、捕食を免れる。

2) 有機リン剤・カーバメイト剤などに対する殺虫剤抵抗性の増進

殺虫剤による高い死亡率をくぐり抜けた殺虫剤抵抗性をもつ個体は、有機リン剤に対してはエステラーゼB1遺伝子の変異をもっている。カーバメイト剤に対してはアセチルコリンエステラーゼ遺伝子の翻訳後修飾に関する変異をもっている。殺虫剤による強い自然選択が、次世代で抵抗性をもつ個体の増加をもたらす。

3) マラリアとヒトの鎌型赤血球突然変異

1塩基の突然変異によって、ヘモグロビンβ鎖

の6番目のアミノ酸がグルタミンからバリンに置換されることによって起こる。ホモ接合では重度の貧血症を引き起こすが、ヘテロ接合体ではマラリア蔓延地域で抵抗性を発揮する。アメリカ合衆国の黒人では0.25%で発症するが、西アフリカのマラリア蔓延地域では現地人の40%がヘテロ接合体でこの突然変異を保有する。

4) ヒマラヤを越えて渡るインドガンの酸素吸着力の高いヘモグロビン

インドガンは高度8000mを飛んでヒマラヤを越えた渡りをする。この鳥のヘモグロビンα鎖の119番目のアミノ酸がプロリンからアラニンに置換している。このためβ鎖の55番目のアミノ酸であるロイシンとの間でギャップが生じ、結晶構造を作るために、高度8000mの酸素分圧の低いところでも酸素吸着能力が高いため、飛翔可能となる。

このように自然選択の事例はたくさん見られる。そこで、自然選択の話題になると必ず登場する「キリンの首」について簡単に答えておきたい。なぜキリンだけ、あのように首がながくなったのか？長い首には「高い枝の葉を食べる」、「肉食獣を見張る」、「雄同士の配偶者獲得競争」・・・など、生存と繁殖に有利な条件についてはいくらかでも考えられる。問題なのは、首の骨の伸長、それを支える筋肉系、高い血圧を実現する変異が、どのような遺伝子で起こったかということであるが、これに答えられないのは、自然選択のロジックが破綻しているからではない。単に、分子生物学がまだ野生動物を研究対象としていないから、データがないだけである。最近目覚しく発展している進化発生学(EvoDevo)が、近い将来、野生動物の形態形成に関与する遺伝子を明らかにしていこう。

中立説

1) 突然変異、2) 遺伝的浮動、3) 自然選択による純化淘汰、この3つの要因がそろって分子進化が起こるとする。この分子進化の中立説は、現行の「高校生物II」の教科書で取り上げられている。

木村資生(1968)が中立説を提唱した。その考えによると、突然変異遺伝子には、自然選択上で有利でも不利でもない中立な変異が多いはずで、そ

れ以外は、ほとんどが有害な変異であり、有利な変異はまれである。そして、突然変異による変異供給と小集団に作用する遺伝的浮動が、中立な変異を蔓延させることもある。つまり一定速度で分子情報は置き換わるのである。

遺伝的浮動とは、確率的な過程で起こる親世代と子世代の遺伝子頻度変化であり、集団のサイズが小さいほど大きく作用する。突然変異で生じた新たな変異は、この遺伝的浮動のため有限時間内に集団から消失するか、固定するかのいずれかの運命をたどる。これを遺伝子頻度のランダムウォークという。完全に中立な遺伝子は、集団のサイズを N とすると出現してから平均 $4N$ 世代で固定し、その確率は $1/2N$ である。

中立説を支持する例として、1) 脊椎動物の分岐年代に比例して、ヘモグロビン α 鎖のアミノ酸配列の差異が大きくなる「分子時計」の現象、2) タンパク質をコードする遺伝子では、同義置換の速度が非同義置換よりも圧倒的に速いという現象、3) 偽遺伝子、イントロンなどの機能を持たないDNA領域は非常に高速で置換が進む、ことがあげられた。

高校でどのように進化を教えるのか？

これは中学校でどこまで進化を教えているのかに依存する。中学校レベルの教科書としては、検定外の「新しい科学の教科書Ⅲ」は「進化のしくみ」をうまく説明している。また生物分類の階層性も中学校3年生で取り上げている。検定教科書では高校生物Ⅱで階層的分類が登場する。生物界の基本的な見方を定める階層的分類は、できるだけ早い段階で教えた方がよい。検定教科書でも嶋田氏が編纂した三省堂の生物Ⅱでは、分子時計、分子進化の中立説を支持する事例、分子系統樹をここでの提言に沿った形で取り上げている。

1) 分子時計

脊椎動物のヘモグロビンのアミノ酸配列をヒト・ウシ・カンガルー・イモリ・コイ・サメで比

較すると、ヒトとウシは17箇所の違いがあるが、ヒトとサメでは79箇所におよぶ。アミノ酸の置換数より、比較対象されている分類群が分化した年代を推定し系統樹を描くことができる。

2) 分子進化の中立説を支持する事例

代謝などの重要な機能をもつ遺伝子は、それほど重要な機能をもたない遺伝子に比べて、余り変化しない。タンパク質のアミノ酸配列についても同様で、そのタンパク質の働きに重要な部位のアミノ酸配列は、それ以外の部分と比較して変化が少ない。

アミノ酸の種類を決める mRNA のコドンでは、指定するアミノ酸が変化しないことの多い3番目の塩基の置換（同義置換）は、指定するアミノ酸が変わることの多い1番目や2番目の塩基が置換（非同義置換）する割合よりも高い。イントロンなど、まったく発現しないDNAの塩基配列は、生物ごとに大きく変化している。

3) 分子系統樹

ある遺伝子の塩基配列を比較すると、鳥類がワニと共通の祖先から出現したこと、クジラとウシが共通の祖先から分かれたことなどがわかる。高校生物レベルでは、分子系統樹を提示するときには、その分岐の形状だけを正確に表現し、分岐してから年代の示す枝の長さは考慮しなくてもよからう。

おわりに

あらゆる生物学は、進化に照らして扱わなければ意味がない・・・(T. ドブジャンスキー)

1) 暗記量を減らし、「進化のしくみ」をていねいに解説する。2) 知識の量ではなく、ロジックの理解を重要視する。3) 試験で、穴埋め問題ばかり出しているのはダメ！このような提言を行いたい。