［第1回］

ヒトとサルの祖先は共通

池田 博明 *Hiroyoshi Ikeda*
元・神奈川県立西湘高等学校 教諭／高校 生物教科書（啓林館） 編集委員

新学習指導要領により，高校生物は『生物基礎』2単位，『生物』4単位となった。筆者は『生物Ⅰ』でも進化的単元を盛り込んで教えようという提言をしてきたが，ヒトゲノムが明らかになって以降，ゲノムテクノロジーが急速に普遍化し，いまや「進化」に関連する学習は『生物』の「進化」の単元に限らず，『生物基礎』のあらゆる単元に関連する状況になっている。また，SSH（スーパー・サイエンス・ハイスクール）校ではゲノム研究に取り組むところも出てきている。しかし，教員の間に急激な革新による戸惑いが生じているようだ。宮田隆『分子からみた生物進化』（講談社，2014年）のような有用な一般書も出版されているが，これまで教科書の表舞台に立つことが少なかった進化の単元の取り扱いに困っているという声も聞く。そこで，授業での経験をもとに，高校生の関心を引く進化の教材を提案することにした。生徒は『生物基礎』は履修済みであると想定した。したがって，遺伝子がDNAであり，塩基配列が遺伝情報であることは知っているものとする。

講義予定

第2回
「**ダーウィンフィンチの自然淘汰**」

第3回
「**突然変異**」

第4回
「**集団遺伝学**」

第5回
「**進化発生学**」

第6回
「**進化を観察する**」

進化の木

ビーグル号の航海（1831～1836年）でダーウィンが収集した標本はそれぞれの専門家が研究して論文にしていった。それらの論文を編集する過程でダーウィンは徐々に「種は変化する」という考えを形にしていった。ダーウィンが1837年から個人的につけ始めたノートの最初のページには非対称的に枝分かれする1本の木のイメージが描かれていた。「進化の木」とよんでよい図像である（**図1**）。

この図像はやがて『種の起原』（1859年）では進化の概念図に発展する（**図2**）。『種の起原』の図はこれ1枚だけである。縦軸は時間を表し，下から上へ流れている。平行線の間隔について，ダーウィンは「とりあえず一千世代くらいを想定してあるが，むしろ一万世代としたほうがよいかもしれない」と記す。彼は「図のA種は，一千世代を経てa^1とm^1という二つの顕著な変種を生み出したことになっている」と続ける。原種が変異した条件が続き，変異する傾向それ自体が遺伝的なものであれば，変異は続くだろうと考察する。**人為選抜**を選

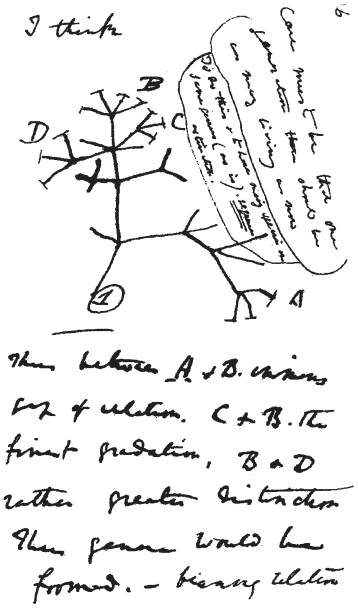

図1 ダーウィンが最初にノート（1837）に書いた「進化の木」

出所：カール・ジンマー．（長谷川眞理子　日本語版監修）進化～生命のたどる道（岩波書店，2012）．

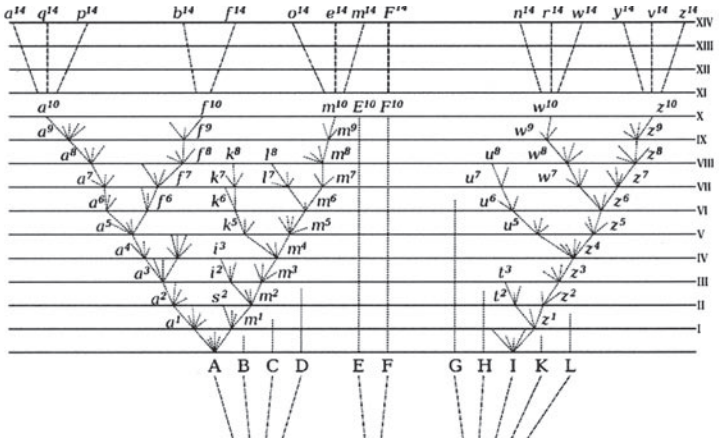

図2　『種の起原』にダーウィンが載せた進化の概念図

出典：ダーウィン.（渡辺政隆 訳）種の起源（光文社古典新訳文庫, 2009）.

択のイメージにしていたダーウィンは自然選択でも有利な形質をもつ種が徐々に進化していくと考えていた。**正の自然淘汰**である。『LIFE』の訳書『大学の生物学教科書』第4巻で，斎藤成也はダーウィンのNatural Selectionに「正の自然淘汰」という訳語を当てている。この扱いは正しく，たとえばダーウィンは，途中である種が途切れているのはより改良の進んだ種に取って替わられた結果であると書いている。

現代の進化学では，必ずしも適者生存 (Survival of the fittest) とは考えていない。むしろ偶然の要素が大きく，好運なものが生き残る (Survival of the luckiest) と考えている。しかし，19～20世紀の進化説は適者生存で，適応万能論であった。中立説（1986年提唱）の普及にはまだほど遠い。

『種の起原』以降，種の変化つまり**種分化**が進化説の中心にあり，種分化を表すのが「進化の木」であるというイメージが形成された。ヘッケルは分類学にも「進化の木」のイメージを取り入れ，ヒトを進化の頂点とする**系統樹**を考案した（1866年）。ダーウィンが『種の起原』で示したような種分化を表す分岐図と，分岐をもたらす仕組みの解明が現代の進化研究者の目指す目標である。現代の進化説の分岐の原理を考察するうえでのキーワードを四文字熟語5語で表すと，**個体変異**，**過剰生産**，**自然淘汰**（自然選択），**突然変異**，**中立進化**である。

ダーウィンの躊躇について

進化というアイデアを得たダーウィンがその公表を躊躇したのは，ヒトの起源に関するキリスト教の教義との違いにあった。キリスト教では，ヒトは創造主が自らの姿に似せて造ったものだとされているからである。進化説を認めると，ヒトはサルと共通の祖先から進化してきたことになる。そんな邪説をキリスト教が認めるわけがない。

ダーウィンが『種の起原』を公刊すると案の定，ヒトの起原が最大の焦点になった。自らの著作が引き起こすだろう宗教的な混乱を懸念していたダーウィンは『種の起原』ではヒトの起原については触れていない。『種の起原』は自然神学書の体裁を取っていた。ダーウィンがヒトの起原について書いたのは『種の起原』から12年後の『人類の由来および性淘汰』(1871～1872年)だった。ダーウィンがキリスト教信仰を棄て，自然淘汰は神とは無関係で無目的な自然現象とみなすようになったのは遅くとも1860年代後半とされる (松永，1996)。

進化論に対する宗教界の反発

ダーウィン自身は進化説に対する宗教界からの反発が起こした論争の表舞台に立ったことはない。ダーウィンの代わりに論争を引き受けたのはハクスリーだった。1860年6月30日，英国のオックスフォードで開催されたイギリス科学振興協会の会合で主教ウィルバーフォースの「あなたのご先祖はサルだということですが，それはお祖父さんの側ですか，それともお祖母さんの側ですか」という質問に対し，ハックスリーは「私はサルが先祖だからといって恥ずかしいとは思いません。それよりも，豊かな能力を駆使して詭弁(きべん)をふるう人物を先祖にもつ方がよほど恥ずかしいと思います」と答えて，聴衆の喝采(かっさい)を浴びたとされている。この話の証言者はダーウィンの友人フッカーで，30年以上も後の記憶であるから，有名な逸話とはいえ，もはや「伝説」の類である。ウィルバーフォースの批判（会議の5週間前の書評）は科学的根拠に基づいて論駁(ろんばく)しようとしていて，的を得たところも多かったという。ただ，ウィルバーフォースは，宗教上の信念からも，人類の由来に関しては「人類の野獣起源説」を認めるわけにはいかなかった (松永，1996)。

しかし，その後，科学と宗教は分離し，進化の事実は徐々に一般の人々の間にも浸透していったのである。

人類と類人猿

霊長目（サル目）のなかでヒトに近いサルはモンキー (monkey) ではなく，エイプ (ape) とよばれている。日本語では類人猿である。現生の類人猿にはチンパンジー，ボノボ，ゴリラ，オランウータンの4種がいて，このうちどの類人猿がヒトにもっとも近縁かは難問の一つだった。チンパンジーとボノボ，ゴリラはアフリカ大陸に，オランウータンはボルネオ島に生息している。

現生の大形類人猿

ボルネオ島とスマトラ島に

ダーウィンはゴリラやチンパンジーがアフリカに生息していることから，ヒトの祖先もアフリカに生息していたと推測していた (ダーウィン, 1871)。ハクスリーやダーウィンら19世紀の進化論者はヒトと類人猿は共通の祖先から由来したと正しく結論したのに，それ以降の多くの科学者たちは，この結論が暗示する類

人猿とヒトとのきわめて密接な関係に不快になり，ヒトと類人猿との進化的な距離と時間をできる限り隔てようとした。1970年代前半には大抵の古人類学者はヒト*Homo sapiens*とアフリカの類人猿が分岐したのは2,000万年ほど前だという説を支持していた。しかし，その後，ヒト科の化石人類とされた1,400万年前のラマピテクスが実はアジアの類人猿の祖先とみなされるという重大な変更があり，ヒトとアフリカの類人猿の距離は接近してきた（レウィン，1984）。

分子系統学が示す分岐の証拠と分岐年代は，ヒトと類人猿の進化の見方にも劇的な変更をもたらした。1962年にグッドマンが血清アルブミンを材料にして免疫学的な距離のデータを取り，ヒトはチンパンジーやゴリラと近く，オランウータンとは遠いことを示した。1967年にサリッチとウィルソンはグッドマンの方法を定量化し，同じ結論を得るとともに，免疫学的距離が時間に比例することを利用して，ヒトとアフリカの類人猿との分岐を500万年前と推定した（**図3**）。これは古人類学者の推定値より飛び抜けて近かった（颯田・斎藤，2006）。

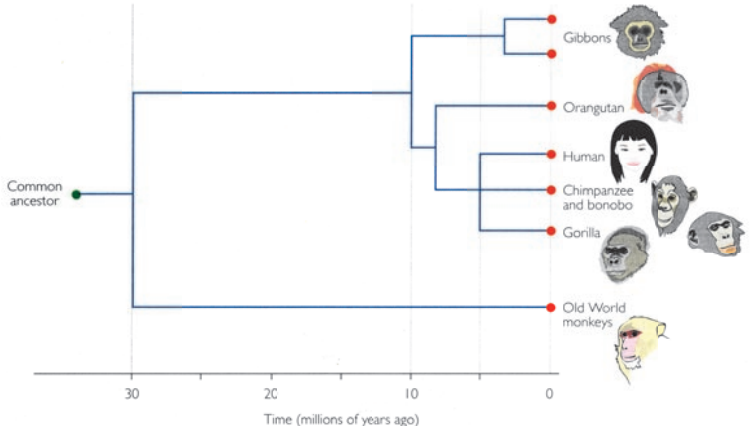

図3　サリッチとウィルソンによるタンパク質の免疫学的距離による系統樹

アフリカの類人猿とヒトの分岐を500万年前と提示した。

出典：Freeman and Herron. Evolutionary Analysis. 4th edition, Figure 20.2, p.756 (Pearson, Education., 2007).

ヒトとチンパンジーの近縁さは染色体の研究からも裏づけられた。類人猿の染色体数はいずれも48本で，ヒトの46本より2本多いが，分染法という染め分け技術によって，ヒトの第2染色体がチンパンジーの第12染色体と第13染色体の端部付着型染色体の融合によって生じたことがわかった（1975年）（**図4**）。ゴリラとオランウータンよりもヒトとチンパンジーの一致度は高かったのである（尾本，1992）。その後，分子系統学の標的はタンパク質からDNAに移る。特定の遺伝子DNAの塩基配列を種間で比較することが可能になった。遺伝子による研究からはオランウータンがアフリカの類人猿よりは早く分岐したことや，チンパンジーとボノボが非常に近縁であるといったことは確実だったが，チンパンジーよりもゴリラの方がヒトに近縁であるという考察も現れた。

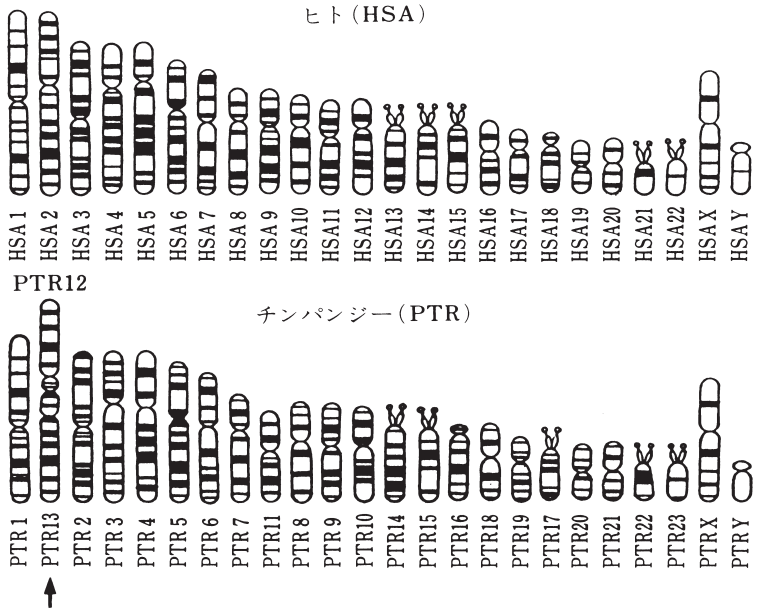

図4　ヒトとチンパンジーの染色体の分染法による比較

ヒトの第2染色体はチンパンジーの第12および第13染色体が融合して生じた。

出典：尾本惠市. 人類の進化. in 石川統ほか, 生物の起原と進化～基礎生物学講座8（朝倉書店, 1992）.

ヒト，チンパンジー，ゴリラ，ボノボの系統樹は4通りが有りえた（**図5**）。ミトコンドリアDNAを用いた分子系統学的研究により，ヒトにもっとも近縁な類人猿はチンパンジーであることが確定された（宝来ら，1995）。ヒトとチンパンジーのように近縁の種を比較する場合には，十分な数の塩基置換を検出する

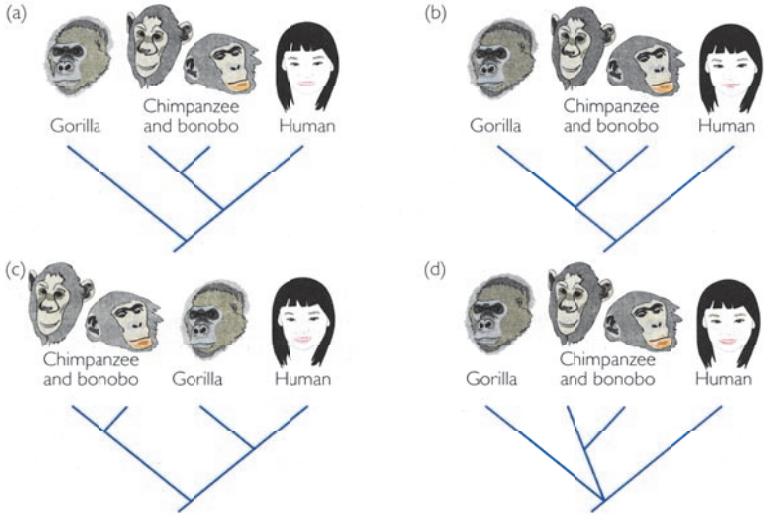

図5　ヒトとアフリカの類人猿の系統の可能性

出典：Freeman and Herron. Evolutionary Analysis. 4th edition, Figure 20.3, p.757 (Pearson, Education., 2007).

ために，進化速度の大きい遺伝子を用いる必要がある。そこで用いられるのが**偽遺伝子**(pseudogene)である。偽遺伝子とはタンパク質を作る能力を失った遺伝子である。

霊長類で6個の偽遺伝子の有無を調べた例がある（**図6**）。ヒトとチンパンジーがもつ偽遺伝子は共通だったが，ゴリラやオランウータンではヒトがもつ1種を欠いていた。ゴリラのもつ偽遺伝子α-エノラーゼΨ（イプシロン）1のほうがオランウータンのASΨ7より見積もり年代が新しいことからゴリラの分岐のほうが新しいと推論できる。

図6　ヒトとサルのもつ偽遺伝子の比較

出典：Freeman and Herron. Evolutionary Analysis. 4th edition, Figure 2.24. p.58 (Pearson, Education., 2007).

偽遺伝子の見積もり分岐年代を考慮して系統樹を書くと下記のかたちになる。偽遺伝子の有無だけでなく，特定の偽遺伝子の塩基配列を比較して系統を想定する研究も盛んにおこなわれた。どの結果においても，ヒトにもっとも近縁な類人猿はチンパンジーだった（**図7**）。

2001年にヒトの全ゲノムのドラフト配列が発表された（最終版は2003年）。チンパンジーの全ゲノムのドラフト配列の発表は2005年であった。

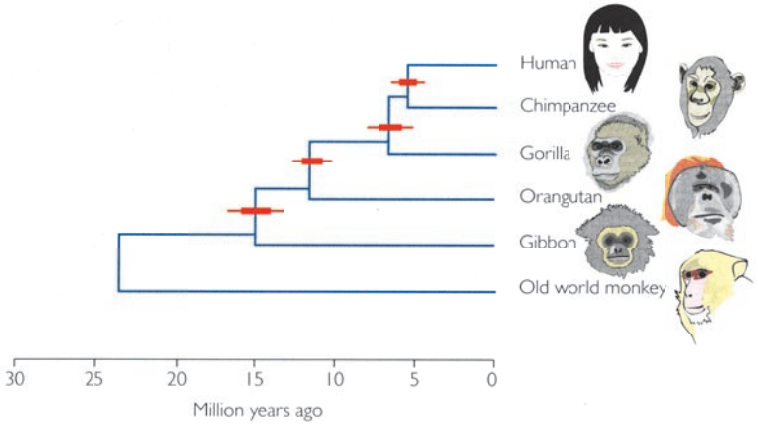

図7　遺伝子によるヒトとサルの系統樹

出典：Freeman and Herron. Evolutionary Analysis. 4th edition, Figure 20.6., p.761 (Pearson, Education., 2007).

非コード領域に差がある

ヒトとチンパンジーのゲノムを比較したところ，相同配列部には1.23％の違いしかなかった。挿入欠失による相違が3％，重複や反復配列の違いがさらに数％あるとされている。ゲノムの差がほんのわずかであるにも関わらず，ヒトの特異性の理由が何なのか，それはまだよくわかっていない。

ホメオボックスのように異なる生物間で共通の遺伝子があることがわかってきた。ショウジョウバエもマウスもヒトもホメオボックスは共通なのである。発生に関する遺伝子が共通だとすると，いったい形態の多様性は何に由来するのだろうか。進化発生学が注目するのは遺伝子の発現調節である。調節の鍵となる物質はタンパク質をコードしない領域，つまり非コード領域にも数多く含まれているようである。生物が複雑になるほど，全ゲノムに対する非コード領域の割合が多くなることが知られている（**図8**）(東中川 2008)。ヒトとチンパンジーの違いの謎の多くは非コード領域に潜んでいるのかもしれない。たとえば、ヒトの四肢の発達を支配する調節遺伝子が非コード領域に発見された (Prabhakar *et al.*, 2008)。遺伝子の重複と欠失がヒトではチンパンジーよりも多く起こっていることも関係があるかもしれない。探求は始まったばかりなのだ。

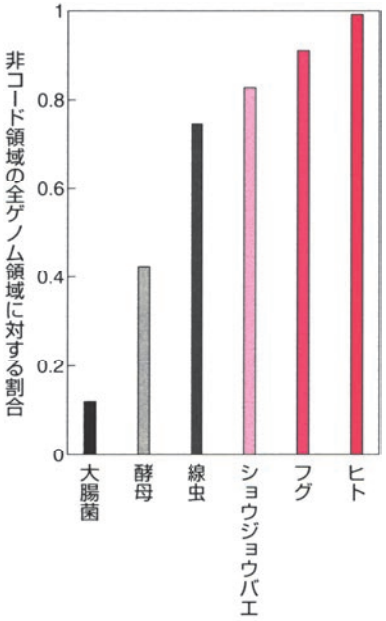

図8　生物の進化と非コード領域の割合

出典：野地澄晴. in 東中川徹, 八杉貞雄, 西駕秀俊. ベーシックマスター 発生生物学, 図14.1., p.313 (オーム社, 2008). (Taft, R. J., Pheasant, M.& Mattick, J. S. *Bioessays*, 29, 288–299 (2007). 図1より改変)

［文　献］

1) Freeman and Herron. *Evolutionary Analysis. 4th edition*. (Pearson, Education, 2007).
2) 石川統ほか. 生物の起原と進化. 基礎生物学講座8 (朝倉書店, 1992).
3) 尾本惠市. 人類の進化. 基礎生物学講座8 (朝倉書店, 1992).
4) 颯田葉子・斎藤成也. 遺伝子からみたヒトの進化. シリーズ進化学5 (岩波書店, 2006).
5) 日本進化学会編, 進化学事典 (共立出版, 2012).
6) 斎藤成也ほか. ヒトの進化. シリーズ進化学5 (岩波書店, 2006).
7) ダーウィン. 種の起原 (渡辺政隆訳) (光文社古典新訳文庫, 1859).
8) ダーウィン. 人類の由来, および性淘汰. (池田次郎訳) (中央公論社世界の名著1871–1872), (長谷川真理子訳) (文一総合出版, 1871–1872).
9) 東中川徹ほか. 発生生物学. (オーム社, 2008).
10) 松永俊男. ダーウィンの時代・科学と宗教 (名古屋大学出版会, 1996).
11) 宮田隆. 分子からみた生物進化. (講談社, 2014).
12) レウィン. ヒトの進化. (岩波書店, 1984).
13) コーエン, チンパンジーはなぜヒトにならなかったのか (講談社, 2010 (訳書2012)).
14) Horai, S., Satta, Y., Hayasaka, K., Kondo, R., Inoue, T. *et al. Journal of Molecular Evolution* **35**, 32–43 (1992).
15) Prabhakar, S., Visel, A., Akiyama, J. A., Shoukry, M., Lewis, K. D. *et al. Science*, **321**, 1346–1350 (2008).

池田 博明 *Hiroyoshi Ikeda*

元・神奈川県立西湘高等学校 教諭／高校 生物教科書（啓林館） 編集委員

略　歴：北海道大学理学部生物学科動物学専攻卒。神奈川県立高校勤務を経て，ナチュラリスト。インターネットに「IKEDA HOME」「高校生物」「SPIDER DATA」などを公開。
専　門：生物教育，クモの分類・生態学。日本生物教育学会・日本蜘蛛学会会員
受賞歴：日本進化学会より教育啓蒙賞（2003年），神奈川県優秀教員（2004年）
著　書：『クモ生理生態事典』（自刊）・『クモの巣と網の不思議』（文葉社，夢工房，2013年復刻）