



生物の分類に必要な数量的思考 : 進化を学ぶ前にできること

樋口, 真之輔

(Citation)

研究紀要 : 神戸大学附属中等 論集, 7:15-21

(Issue Date)

2023-03-31

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100480900>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100480900>



実践報告

生物の分類に必要な数量的思考：進化を学ぶ前にできること Quantitative thinking required to classify organisms: what we can do without “evolution”

樋口 真之輔
HIGUCHI Shinnosuke

生物進化を考慮することなく中学1年生が動物の「分類」を論じることは可能、あるいは適切かという問題意識から出発し、「生徒が数量的に動物の形質を捉え、分類の階層性を認識する」ことを目指した授業内容を報告する。まず、生徒は脊椎動物のそれぞれの分類群に属する生物を、棲息環境、生殖様式、呼吸のしかたといった観点での共通点・相違点を数量化した表を作成した。この表を基に、生徒は手計算が可能な系統樹構築の手法であるUPGMA（平均距離法）により、簡易な系統樹を作成した。本取組みにより、生徒が系統の階層性や中間的な分類群の存在を認識でき、以降の学習で進化の視点を踏まえて生物系統を考えるための素地を形成できた。さまざまな制約により中学1年生では生物の進化を正面から取り扱えないとしても、生物の形質について数量的な取り扱いを学ばせることは、世の中に存在する多様な生物を科学的な仕方理解するために必要で意義があることだと結論づけた。

Starting from the question of whether it is possible or appropriate for seventh grade students to discuss animal “classification” without considering evolution, I report on a series of lessons designed to help students grasp animal characters quantitatively and to recognize the hierarchy of classification. First, students created a matrix quantifying the similarities and differences between vertebrate taxa in terms of habitat, reproductive mode, and respiration. Based on the matrix, students drew a simple phylogenetic tree using UPGMA, a method for constructing phylogenetic trees that can be calculated manually. This approach enabled students to recognize the hierarchy of classification and the existence of intermediate taxa, and provided the basis for considering biological phylogeny from an evolutionary perspective in their subsequent studies. Although various constraints prevented the students from studying with evolution in the seventh grade of lower secondary school, I concluded that it was necessary and useful for students to learn the quantitative treatment of biological characteristics in order to understand the diversity of life in the world in a scientific way.

キーワード：生物の分類、形質、系統樹、UPGMA、平均距離法

Keywords: classification of organisms, characteristics, phylogenetic trees, UPGMA

I はじめに

1 自然分類と人為分類

バンド・SEKAI NO OWARIの2022年のヒット曲「Habit」の歌詞（Fukase, 2022）は、次のようにはじまる。

君たちったら何でもかんでも
分類 区別 ジャンル分けしたがる
ヒトはなぜか分類したがる
習性があるとかないとか

この楽曲が音韻的に優れているのはもとより（このような議論は、例えば北村（2006）が詳しい）、

詩の内容が様々な自己や他者を「分類」し、さまざまな「分類」の間を揺れ動く人間の心の機微を活写しているとみることが出来る。

生徒たちは実際に、学校生活でもほとんど無意識に分類を行い、また活用している。学級における人間関係、立ち居振る舞いに基づいても様々な分類を行う。前述の歌詞からいくつか抜書きすれば「持ってるヤツ」「モチないやつ」「隠キャ」「陽キャ」など。あるいは、日常の語彙で言えば「運動部員」「保健委員」「理科リーダー」「8月生まれ」「小集団 3B」などもそうといえるかもしれない。学級の係などは、40人いる学級に必要な様々な仕事をうまく分担するための便宜上の、広義の「分類」といってよい。

理科の学習でもやはりさまざまなものを分類する。動植物はもちろん、水溶液（電解質・非電解質）、有機物・無機物、単体・化合物・混合物も分類である。力や仕事だって分類できる。理科の学習はいろいろな現象や共通点や相違点を基にして分類できることを理解しながら進展していくのだ。こうしてみると、分類の大切さは生物分野に限らないが、中学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編（文部科学省、2018）において、やはり分類の仕方の基礎は生物を例にして身につけることとされているので、次項以降では生物における分類について検討してみる。

2 自然分類と人為分類

生物の分類について考えるとき、分類される生物が辿ってきた進化の道筋を抜きに論じることができない。生物学的に「分類」といえば、自然分類を指し、生物がもつ形質に基づいて分類することを意味する。かつ、生物の進化と分岐の歴史に基づく類縁関係すなわち系統分類と一致するように分類するのが大前提である（馬渡、1998など）。

自然分類に対して、人為分類とは生物の類縁関係に基づかない分類である。植物でいえば「毒草」「薬草」「雑草」というように人間との関わりに基づいて生物のグループを認識しようとする。人為分類は生物学にとっては無用だと思われる向きもあるが、例えば「草食動物」「肉食動物」のよ

うに、生物の生き方をうまく捉えるために活用することもできる。このように理科の学習においても、自然分類と人為分類とを場面に応じて意識的に使い分けことが生物学的ことがらを理解するうえで大切である。

3 中学校理科における「分類」と進化

前項にもかかわらず、実際に教科書やその他の教材の記述を分析すると、残念ながら生徒が、系統分類を反映した分類とそうでない分類を区別することは困難であることがわかる。私はこの原因として、中学3年生で「生物の種類の多様性と進化」を扱うまでは系統分類に基づく分類体系が注意深く排除されていることが関係していると考えている。というのも、当該の学習指導要領解説において、内容2(1)イ「いろいろな生物を比較して見いだした共通点や相違点を基にして分類できることを理解するとともに、分類の仕方の基礎を身に付けること」に係る解説の最終段落において、次の記載がある（下線は報告者による）。

なお、ここでの分類は、観察及び資料等から見いだした観点や基準を基にして行わせるものとし、目的に応じて多様な分類の仕方があり、分類することの意味に気付かせるような学習活動を設定することが重要であり、学問としての生物の系統分類を理解させることではないことに留意する。

科学の世界における生物の分類とは自然分類すなわち系統分類を反映した分類である。この意味で、解説における「分類することの意味」は、先述の歌詞で述べられているような「分類」と何ら変わらない。解説にあるように「生物の系統分類を理解させること」が主目的ではないとしても、現状の教材の記述では、系統分類の視点が意図的に排除されていると言わざるを得ない。

なお、本稿では教科書や教材の記述に生物の系統分類が反映されているように読めないことをもって「系統分類の視点が排除されている」と述べたが、それが具体的にどのような有様であるか、ならびにその具体的な弊害については、本報告の

趣旨からして別の機会に論じることとする。

中学1年生の理科が系統分類学的視点を放棄しているからといって、そのすべての要素を考慮せずに授業を進行するのは、無理なことである。なぜなら、生徒はすでに生物の進化についてそれぞれの仕方知っているからである。

4 形質を数量化するためのUPGMA法

本実践では、生徒自身が計算によって生物がもつ形質の「距離」を見いだせるよう、UPGMA (Unweighted Pair Group Method using arithmetic Average、平均距離法や非荷重結合法とも呼ばれる) (Sokal & Michener, 1958) を用いることにした(図1)。この方法ではまず、注目する生物のすべての組み合わせにおいて、形質の差異を数値で表した行列をつくり、それぞれの成分を「距離」とする。すなわち似た形質をもつ生物ほど「距離」が小さくなる。次いで、図1の要領で距離が小さい2生物を1つにまとめたグループをつくる作業を、グループが残り2つになるまで繰り返し、枝長が「距離」と一致するような系統樹を作成する。

UPGMAは、行列の中で最小の成分を見つけて結合し、平均を取るという単純な手法であり、おそらく系統樹を作成するにあたって手計算が可能な唯一の方法である。形質の間で重み付けができず、また進化速度が一定であるという仮定が必要のために、実際には誤った推定を行いがちであるという問題点がある(Hall, 2011)。それでも、中学生が生物の形質を数量化した上で、生物学的な妥当性をもつ系統樹を作成し、系統の階層性を意識するためには十分に有用かつ適切な方法である。

本稿で報告するのは、単元「動物の特徴と分類」の「背骨のある動物」を題材として、脊椎動物の5つのグループがもつ形質として中学1年生理科の教科書(啓林館)で紹介されているものについて、UPGMAにより系統樹を作成する実習を行った記録である。天下り的に脊椎動物の5分類を提示するのではなく、生徒たちが実感を持ってそれらの中間的分類群とともに生物の分類群やその階層性を見出し、以降の学習で進化の視点を踏まえて生物系統を考えるための素地の形成を目指した。

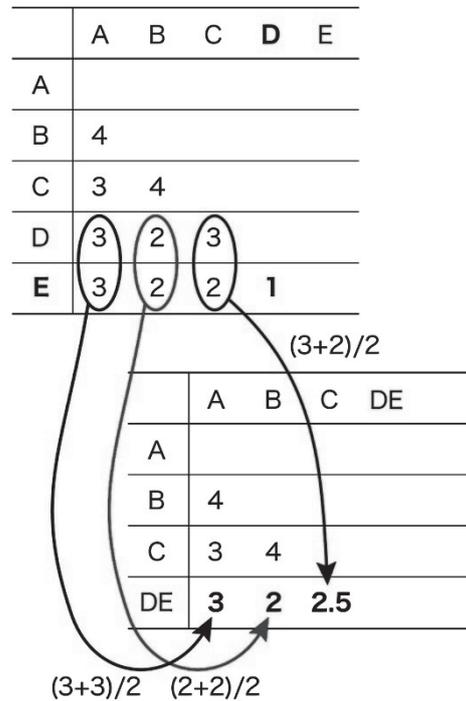


図1 UPGMAの概略。行列の成分の中で最も「距離」が小さい2生物を1つにまとめた生物群とする。このとき、1つにまとめられた生物群と残りのそれぞれの生物との「距離」は、まとめられた2生物と残るそれらの生物の距離の平均値とする。これを生物群が2つになるまで繰り返す。

II 実践

1 対象の授業

本実践は、報告者が授業者として担当する「科学総合」(2022年度中学1年生段階対象)の授業で行われた。教科書は啓林館『未来へひろがるサイエンス1』を使用し、週4時間の授業である。これを2名の担当で週2時間ずつに分割し、便宜上「科学総合α」「科学総合β」と称して、担当教員の専門性やカリキュラムマネジメントの視点から単元の割り振りを決定している。

本稿で報告するのは、2022年7月に2時間を充てて実施した内容である。

2 授業者のはたらきかけと生徒の活動（第1時）

1) 動物の体のつくりの特徴

まず、生徒に「動物の体のつくりと生活」について知っている事柄を問うた。動物園で飼育されている「動物」はほぼすべてが脊椎動物であることから想像できるように、生徒にとって動物といえは脊椎動物である（さらにいえば、その中でも9割以上を占める羊膜類すなわち哺乳類・爬虫類、鳥類である）。そして生徒たちは、一般的な脊椎動物についてはよく知っているし、哺乳類や鳥類、爬虫類といった分類群の名称についてもごく普通に使う言葉である。

すでに「哺乳類」「鳥類」などという言葉を知っているからこそ、「なぜ、それらの名称を分類群として使用できるのだろうか」だとか、「この5分類の妥当性はあるのだろうか」という問いにすぐに行き着くことができる。

2) 自然分類と人為分類

哺乳類、鳥類といった生徒にとってはむしろ馴染みがある分類群について詳しく考える前に、「他の分類方法も考えられないだろうか」と問うてみた。すると、肉食・草食、（ヒトが）食べられる・食べられない、かわいい・かわいくない、こわい・こわくない、ペットになる・ならないなど、いくつでも「勝手分類」（本稿では人為分類といってもよい）を作り、実際に分類することができた（図2）。



図2 生徒と考えた「勝手分類」の例。生徒から出た分類群を採用したうえで、生徒に動物のカードを提示してどちらに分類されるかを尋ねた。この場合は「こわい類」「こわくない類」に加えて「こわいかもしれない類」が登場し、カナヘビは後二者の間に置かれている。

3) 動物の特徴に基づくグループ分け

具体的な動物10種に着目し、4つの特徴についてまとめる活動を4人グループにて行った。本実践では動物種・特徴ともに、それぞれ教科書に記載されているものを用いた（図3）。

動物	生活の場所	体表のようす	……
フナ	水中	うろこ	……
クマ	陸上	毛	……
⋮	⋮	⋮	
ヘビ	陸上	うろこ	……

図3 動物10種の4つの特徴をまとめた表。具体的には動物としてフナ、クマ、ワシ、サンショウウオ、カエル、ウサギ、メダカ、カナヘビ、ペンギン、ヘビが挙げられており、特徴として「生活の場所」「体表のようす」「呼吸のしかた」「なかまのふやし方」がある。

第1時の活動のまとめとして、今回調べた生物10種の特徴4つについては、特徴が互いにすべて一致する動物の組み合わせとして、2種ずつ5つのグループに分けられることを見いだせることを確認した。前述の通り多くの生徒はすでに、脊椎動物の5分類についてわりに馴染みがあるので、とりあえずは抵抗なくこれら5つの分類群を受け入れることができた。

最後に、完成させた表をよく見ればわかるように、「ワシとカナヘビ」、「ワシとフナ」を比較すると前者のほうが高い類似性をもつことに目を向けさせた。そこで、「両者の違いを踏まえて分類群同士の関係性を理解する方法はあるのか」という問いを生徒と授業者の間で共有して次時の課題とした。

3 授業者のはたらきかけと生徒の活動（第2時）

1) UPGMAの導入と計算

動物の特徴の差異の度合いを反映させつつ分類群の関係性を理解する方法はあるのかという問いに基づいて、授業者から、差異の度合いを分類群

間の「距離」として表示するとうまくいくことを伝えた。すなわち、図4のように特徴の差異の個数を数え、その距離を行列の成分とする。すべての特徴が同じだと距離は0、調べた4つの特徴がいずれも異なると、距離は4となる。

今回調べた特徴に関しては、特徴すべてが互いに一致する動物が2種ずつあり、A~Eの5グループに分けられることを前時に確認している。よって5グループそれぞれに対する残り4グループとの距離を考えればよく、かつグループAとB、BとAの距離は同じであるから、この段階で10個の成分のみを考えればよいことになる(図4)。

あとは距離が最小のグループの組み合わせを見つけて新しいグループを作り、残るグループとの距離を平均の計算により算出することを、グループが2つになるまで3回繰り返した。

2) 系統樹の作成

ここまでくれば、UPGMAによって算出されたグループ間の距離にしたがって各グループの関係を系統樹(樹形図)にして表現できる(図5)。見かけの樹形が変わっても、グループ同士の枝分かかれのパターンが同じであれば関係性も同じであることを確認しつつ、樹状図を作成した。本単元に先立って植物の分類を扱ったので、生徒はこのような樹形図を、抵抗なく受け入れられた。

サンショウウオ(カエルでもよい)と、フナ(メダカでもよい)を比較すると、「生活の場所」「体表のようす」「呼吸のしかた」が異なる(「仲間のふやししかた」：卵生のみが一致)ので、距離は3となる。

	A	B	C	D	E
A		4	3	3	3
B	4		4	2	2
C	3	4		3	2
D	3	2	3		1
E	3	2	2	1	

→ AとC、CとAの距離は同じであるので、片方のみ考えればよい

図4 検討する10個の成分。なお、次のように表記を簡略化した。A、サンショウウオとカエル；B、クマとウサギ；C、フナとメダカ；D、ワシとペンギン；E、カナヘビとヘビ。

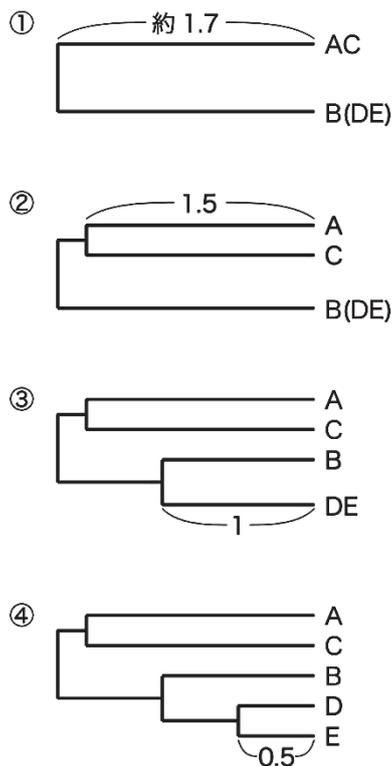


図5 算出された距離に基づく系統樹の作成。①から④の順に枝長を決めていく。ここでは、縦方向の移動距離は計算に入れず、横方向の長さのみを考える。たとえば、①においては計算の結果ACとB(DE)の距離は往復で3.375となるように、片道でその半分の1.6875を枝長とする。またACとB(DE)のどちらを上においても構わない。グループ同士の繋がり方が同じなら、樹形が変わっても意味するところは同じである。なお、A~Eが示す動物は図4と同じである。

3) 系統樹の評価

作成した系統樹を見てまず気がつくことは、前時で示唆されていたとおり脊椎動物の5グループの中で比較的近い関係にあるグループと、遠い関係にあるグループが可視化されているということである。本時のはじめに作った行列の成分との対応を確認しつつ、改めてA~Eのグループの名称を確かめた。

さらに生徒とこの系統樹を眺めると、例えばA(サンショウウオとカエル)、C(フナとメダカ)に対して、B(クマとウサギ)、D(ワシとペンギン)、E(カナヘビとヘビ)の3グループをま

とめる分類、あるいは B (クマとウサギ：哺乳類) に対して D (ワシとペンギン：鳥類) と E (カナヘビとヘビ：爬虫類) をまとめる分類は可能かという「問い」を立てることができた。あるいは、脊椎動物はまず「魚類と両生類」と「哺乳類、爬虫類と鳥類」に分かれているが、まず魚類が分岐するのではないかという指摘もあった。

このように生物の特徴に基づいてさまざまな考察や新しい「問い」を立てたところで、授業者から次のような知見や課題・コメントを紹介して本時のまとめとした。

- 哺乳類・爬虫類・鳥類を含むグループを「羊膜類」と呼ぶこと。これらの動物が共通してもつ羊膜の適応的意義について。
- 正確な系統樹を作成するためには、もっと多くの特徴について検討すべきであること。今回は 4 つの特徴のみに着目し、かつ「距離」を算出する際に各特徴について 0 か 1 で判定し、かつ重み付けも行っていないこと。
- 両生類は「四足動物」として、魚類以外の残り 3 グループと同じ枝に入るらしいこと。
- 爬虫類と鳥類の関係について、爬虫類に含まれる具体的な動物 (ヘビ、カメ、ワニ) を挙げつつ、つい最近まで関係が定まっていなかったこと。ただし、爬虫類が側系統であることには言及しなかった。

III 成果と課題

UPGMA により生物の特徴に基づいて簡易な系統樹を作成することにより、生徒が系統の階層性や中間的な分類群の存在を認識できた。前述の通り、自然分類では生物の進化と分岐の歴史に基づく類縁関係に基づく (ことを目指す) のが大前提である。かといって中学 1 年生で進化を真正面から扱わないとすれば、せめて本実践のように、生物の特徴に基づいて、できる限り多くの情報を基にした客観的な指標を打ち立てなければならない。私は、このような思考を中学 1 年生段階で経験しておくことが、以後の学習で進化の視点を踏まえて生物系統を考えるために必要不可欠な素地を形

成すると考える。

本実践では、報告者が生徒との対話の中で生物を分類する際の思考の変容を見取った。本実践の成果が真に評価可能となるのは、対象となった生徒が中学 3 年生理科の進化にまつわる単元を学習した以降である。

分類にまつわる単元は、本来は進化の視点を抜きに考えることはできない。たとえば西田 (2020) により板鰓類の分類を生徒とともに検討するという先進的かつ意欲的な取り組みが行われており、やはり進化と系統の観点から追求すべき論点が明らかとなった。すなわち、ドチザメを見たときに生徒が提示する分類：サメ類、ドチザメ類、軟骨魚類、板鰓類、魚類、真骨魚類、のなかで適切なものとそうでないものはどのように検討できるだろうか。これに関連して中学生を対象とした質問紙による調査の結果、進化や祖先共有の認識については、「ヒトに向かって進化してきた」という誤った進化観が形成されやすいとの指摘がある (山野井ら、2022)。加えて、2022 年度から年次進行で実施の高等学校「生物基礎」「生物」においても、進化と系統については様々な課題、論点や成果が報告されることになるだろう。それらの知見をも注視しながら、本実践の対象生徒についても、成果と課題を引き続き報告していきたい。

ところで、この植物の分類、特に種子植物・シダ植物・コケ植物の関係については、本稿で問題にしているような分類と系統を巡る議論の観点から大変な問題を孕んでいる。この点については稿を改める。

謝 辞

本実践は、JSPS 科研費 JP20K15830 の助成を受けて実施された研究成果の一部を取り入れたものである。

文 献

- 北村 美樹. 2009. J-POP の音韻的考察. 中京英文学 26 : 1-23.
- 西田成一. 2020. 「魚類との共通点や相違点からサメを分類する ～観点と基準を使って比較し、分

析・解釈・表現する学習～（第1学年 理科学習指導案）」『熊本大学教育学部附属中学校オンライン研究発表会』.

Fukase, Nakajin. Habit. 『Habit』 SEKAI NO OWARI. Virgin Music.

馬渡峻輔. 1998. 分類学とは何か. 日本物理学会誌 53 : 266–273.

文部科学省. 2018. 『平成 29 年中学校学習指導要領解説理科編』 学校図書.

山野井貴浩・小川博久・川島紀子 2022. 理科授業後の中学生の進化についての認識調査 —脊椎動物の祖先共有の認識に注目して—. 理科教育学研究 6 : 215–223.

「レコード大賞にセカオワ」 『神戸新聞』 2022.12.31.

Hall BG. 2011. Phylogenetic Trees Made Easy: A How-To Manual 4th Ed. Oxford Univ Press.

Sokal RR & Michener CD. 1958. A statistical method for evaluating systematic relationships. Univ of Kansas Sci Bull 28 : 1409–1438.