

生物学で楽しむーこんな授業をしてきましたー

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-09-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00067163

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



生物学で楽しむ

— こんな授業をしてきました —

理科 深田 和人

生物は暗記科目であるといわれる。初期発生の過程など、その後の内容の理解に必要な基礎知識を得ることは必要である。一方で、データの分析から分かることを導きだすことが自然科学に他ならない。暗記で終わらせないための実践を報告する。

キーワード：生物学的に探究する能力 授業実践

1. はじめに

「プロとアマの違ってなんだと思いますか。」

大学での理科教育法、本校での教育実習オリエンテーションで必ず学生に問うている。「プロはお金がもらえる」、「プロは夢を与える」等々、いろいろな答えが出てくる。「お金がもらえる」には「アマはお金を払う」が対応しており、一応の説明にはなっている。「夢を与える」に対応するのは……。

「何かのサークルに所属している人、手を挙げてください。」

この問いにはほとんどの学生が手を挙げる。サッカー、テニスのスポーツやバンド、オーケストラの音楽などなど。

3つ目、「次の空欄に当てはまる同じ漢字1文字を記入しなさい。 アマは [] しむ、プロは [] しませる。」

何故サークルに入っているのかと絡めて考えさせる。答えは「楽」。暗記中心の生物において、如何に生徒を楽しませるかに頭を悩ませた30数年。いくつかの項目に分けて、これまで実践してきたことの一部を紹介する。（「楽しませる」には面白可笑しいという意味もあります。このネタもたくさんありますが、研究紀要ということで、断腸の思いで割愛させていただきます。）

2. 実験結果の考察

学習指導要領の生物基礎・生物の目標の一部には、「生物学的に探究する能力と態度を育てる」と記載されている（2022年度からのものは表現が異なるが、趣旨は変わっていない）。「生物学的に探究する能力とは何か」という問いの答えはいくつもあるが、実験結果を正しく考察できることがその1つであることは間違いのないであろう。しかし、教科書に書かれていることはほとんどが事実の羅列、どんな実験をしてどんな結果が得られたからそういうことが分かったかを記載している単元はほとんどない。遺伝子がDNAであることを証明したエイブリーやハーシーらの実験、半保存的複製を証明したメセルソンらの実験、シュペーマンの二次胚誘導くらいであろうか。

教科書で扱ってる分野で、授業に使えるような実験をいかに見つけるかが教材研究のテーマの1つであった。筆者が就職した昭和後期から平成初期は、インターネットは普及しておらず、専門書が唯一の教材研究の手段であった。1冊数千円の書籍の中から授業に使えるネタが1つでも見つかる、精神的に「元が取れた」と喜んだものである。授業で扱っている実験のいくつかを紹介する。

(1) 海水魚の塩類濃度調節

現行の生物基礎では、教科書によって扱いにバラツキがあり、本文に記載されているもの、参考で扱っているもの、全く触れていないものがある。旧課程の生物ⅠBや生物Ⅰでは全教科書が本文で扱っていた。例えば、数研出版改訂版高等学校生物Ⅰ(104 数研 生Ⅰ021)では、「水を補うために海水を飲み、同時に入ってくる無機塩類をえらにある特別な細胞(塩類細胞)で積極的に排出して」と書かれている。生物学に探究する能力を育てるには、この事実を覚えるのではなく、どうやってそのようなことが分かったかを理解させることがはるかに大切であると考ええる。

図1は、『適応の生物学』(内田清一郎, 菅原浩著 講談社)に書かれている, 海水ウナギのえらの Na^+ 輸送に及ぼす阻害剤の影響である。図2は、この図を参考に授業用に改めたものであり、えらの細胞が

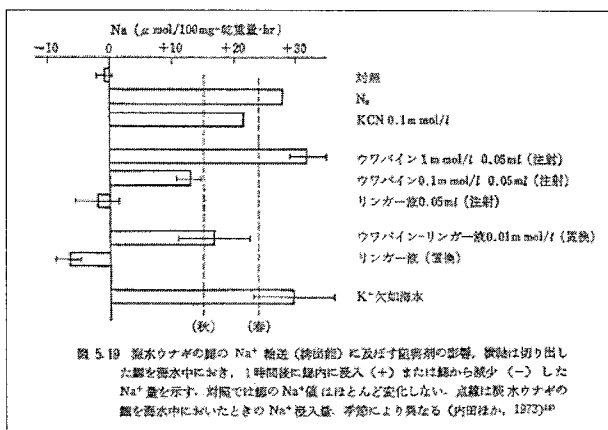


図 1

海水ウナギからエラを取り出し、次の処理を行って海水の入ったシャーレに入れる。1 時間後、エラの細胞内の Na^+ 変化量を調べる。

ア) そのまま イ) 海水中に KCN を加える。

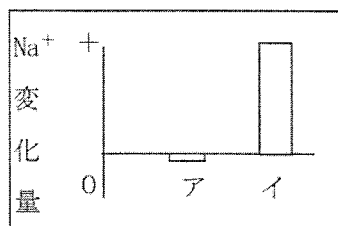


図 2

どのようなしくみで塩類を排出しているか、実験結果から考察させている(旧課程では、能動輸送を詳しく扱っており、その復習・確認も兼ねて説明していた)。現行においても、腎臓におけるグルコースの再吸収で能動輸送について軽く触れ、塩類細胞を理解する上での基礎知識、前提としている。「KCN って何か知っている?」、「青酸カリが毒薬なのは何か?」等の教科書外の知識、一般教養から始まって、「KCN を加えると Na^+ が増えるのは何か?」、「じゃあ通常の細胞ではどんなことをしている?」というように、少しずつ順序立て情報を与えることで、全体を理解できるように努めている。

(2) 走性

各教科書とも、走性に関する記述はほぼ同じであり、「生物は、一定の刺激に対して一定の方向に移動することがある。」(実教出版 生物新訂版(7 実教 生物308))と、軽く触れられている程度であり、本文中または表中にミドリムシ=正の光走性と記載されているに過ぎない。筆者は、以下のように重力走性を扱うことで、生物学に探究する能力を育てている(水生微小生物は、実際はゾウリムシであるが、「繊毛を使って泳いで移動している」という答えが出ないよう、敢えて伏せている)。

試験管に多数の水生微小生物を入れ、空気が入らないようにゴム栓でふたをする。これを垂直に立て、放置すると、微小生物は口の付近に分布した(図3)。この理由として考えられる、微小生物の性質を3つ推測せよ。

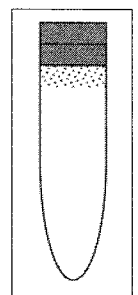


図 3

自然科学に必要な能力として、事実を客観的に解釈できるかどうかがある。先入観が邪魔になって、「光から逃げる」や「空気のある所に集まる」などの答えが返ってくることが多い。求める答えは、「水に浮く」、「上に移動する」、「ゴムを好む」である。

ここで、微小生物=ゾウリムシであることを明ら

かにし、上に移動する＝負の重力走性であることを説明する（「上に向かう＝重力に逆らう」が走性が何故「負」になるかも考えさせる。流れ走性を扱うときに、流れに「逆らう」のが「正」になることも考えさせている）。重力走性であることの確実な証明は、無重力環境に置いてどうなるかを調べなければならないが、まず無理である。ならば、「水に浮く」、「ゴムを好む」を否定する実験方法および結果を考えてくださいという流れで授業を進ませる。この後の詳細は省略するが、ゴムを好むを否定する実験方法として、ほぼ100%「ゴム栓をコルク栓に変えても同じところに集まる」という答えが返ってきて面白い。

(3) 傾性

オーキシンによる光屈性は、ボーセン・イエンセン、ウェントなどが行った実験が教科書に載っており、これらを元に授業を進めることができる。一方で、傾性に関しては、「チューリップの花の開閉は、花卉の内側と外側の成長速度の差によって起こる成長運動である」、「オジギソウの接触傾性は、膨圧の変化によって起こる膨圧運動である」等と記載され

ているのみであり、これらに関する実験を扱った教科書は無い。専門書でもお目当ての実験を見つけることはできずに苦慮していると、大阪大学の1991年度入試が目に残った。以後、この問題の図（図4）をほぼそのまま、内容を少しアレンジした授業を行っている。問題文を以下に示す。

インゲンマメの子葉の次にでる最初の本葉では通常の日照条件で、図1(a)に示すように、昼と夜で葉枕をはさむ葉柄と葉身の間の角度(θ)が変化する。この葉の運動は、葉枕の形が細胞数の変化なしに大きく変化することによって起こることが知られている。そこで、この運動の機構を理解するために次のような実験を行った。実験結果をもとにして、次の各問に答えよ。

〔実験1〕葉枕の部分を5mmの長さにカミソリで切り取り、図1(b)に示すように維管束を境に上側の部分(イ)と下側の部分(ロ)に切断した。(イ)、(ロ)の重さを測り、これらをそれぞれの総重量とした。次に(イ)、(ロ)を乾燥機に入れ、水分を完全に蒸発させてから重さを測り、それぞれの乾燥重量とした。総重量と乾燥重量との差を細胞内に含まれる水分量とした。図2は、2昼夜にわたり適当な時間間隔をおいて測定した(イ)と(ロ)の乾燥重量当たりの細胞内に含まれる水分量を示したものである。

問1. 昼間に葉枕の部分を輪切りにして観察すると、(イ)の細胞と(ロ)の細胞ではどのような違いが見られると思うか。簡潔に述べよ。

問2. (イ)の細胞と(ロ)の細胞の違いは、夜になるとどのように変化すると思うか、簡潔に述べよ。また、そう思う理由を述べよ。

(以下略)

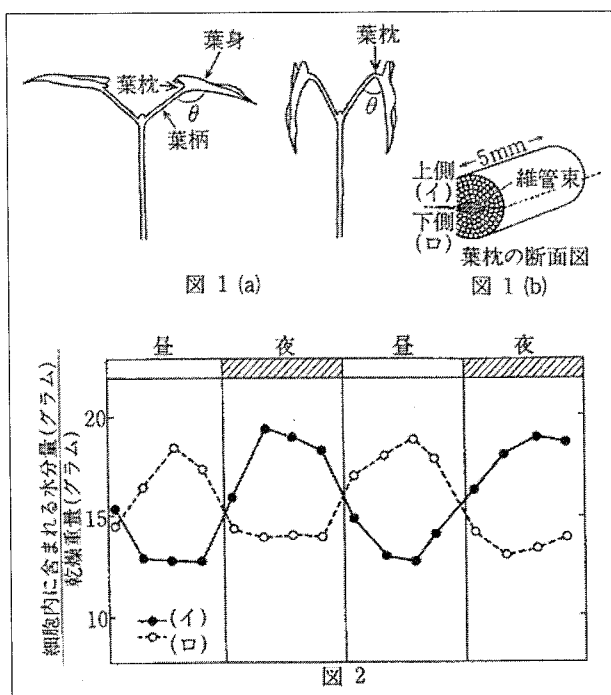


図4

3. 対照実験

実験考察能力と同じくらい強調したのが、対照実験という概念である。半分本気半分冗談で「悪徳商法に騙されないためには、対照実験の発想は大事だよ」と訴えている。対照実験を扱う分野は限られているが、であるがゆえにそのときの授業では必ず触れるようにしている。

(1) 体内環境の維持の仕組み

授業で最初に対照実験が出てくるのは、ホルモンである。両生類の変態と甲状腺、脳下垂体前葉との関係を例に、チロキシン、甲状腺刺激ホルモンののはたらきを扱っている。「甲状腺または脳下垂体前葉を除去すると変態は起こらないことより、変態には両者が関わっている。」と説明すると、素直な良い子である生徒は、頷いて納得する。そこで、待ちましたとばかりに「今頷いた生徒、悪徳商法に騙されないでね」と繰り返す。手術そのものの影響を見る必要があるの、手術をするけど何も除去しないことをしなければならぬと説明すると、改めて頷いて納得する。

続いては、抽出物の注射である。甲状腺を除去したオタマジャクシに、甲状腺の抽出物を毎日適量注射すると変態が起こると説明すると、当然とばかりに頷く。ここで「この実験の対照実験はどういう実験？」と尋ねると、リベンジとばかりに自主的に発言する生徒が出てくる。

「注射そのものの影響を見なければならぬので、針だけ刺して何も注射しない。」

「惜しい。他に影響を見なければならぬものは無いかな。」

「……………」

「抽出物って何かの溶媒に溶かして注射するよね。」

「分かった！抽出物を溶かしている溶媒のみを注射する。」

寒冷刺激に対する対応については、ネコを例に紹

介する。

室内の温度を一定に調節できる部屋があり、これを恒温室という。室温を4℃に設定した恒温室にネコを入れたところ、毛が逆立ち、筋肉で震えが観察された。

放熱抑制のための立毛筋の収縮であるが、さて対照実験は？状況を理解するために、図5のような図を提示している。

「このネコは、閉所恐怖症かも。」

(2) 動物の行動

実験結果の考察の項で述べたが、動物の行動の分野は、いろいろな実験が行われている。専門書にも多くの実験が紹介されており、授業ネタには困らなかった。中でも、『動物の行動』（日高敏孝ほか著 東海大学出版会）は方法および結果がはっきりしている実験が数多く扱われており、分かりやすいある意味、愛読書であった。

授業で扱ったのは、アメリカシロヒトリの性フェロモンである。『動物の行動』を元に、次の実験を紹介した。

アメリカシロヒトリは全身白色をした夜行性の蛾であり、オスがメスを探すのも夜である。オスがどのようにしてメスを探し出すかを調べる一連の実験を行った。

《実験1》メスの腹部を切り取って紙コップに入れ、小さな穴が多数開いた紙で蓋をする（図6）。これを野外に一晩放置する。

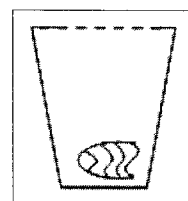


図6

結果：オスが紙コップに近づいてきた。

考察：オスは、メスの腹部から分泌される臭いを頼りにメスを探す。

この実験の対照実験を生徒に問うたときの答えに

は「メスの頭を入れる」、「オスの腹部を入れる」などが出てくる。生徒の中には、何かを入れなければならないという先入観がどうしてもついてくるようである。「何も入れない紙コップを放置する」というと、「何でそんなことする？ 紙コップに寄って来るわけないやろ！」などという返事が返ってくる。理由を説明するとそれなりに納得するが、こういうところで、生物学的に探究する能力が育てられるのではないかと思う。

(3) 定期考査

本年度1年2学期の生物基礎の期末考査で、以下の問題を出題した。

胸腺のはたらきを調べるため、次の実験を行った。

《実験1》出生直後のX系統マウスから胸腺を取り出し、適量の放射線を照射した。この胸腺を、胸腺を除去したY系統マウスに移植した。その結果、Y系統マウスは自己免疫疾患を起こし、死亡した。

《実験2》実験1の対照実験を行ったところ、Y系統マウスは死亡することなく生育し続けた。

問1 実験2では、どのような実験を行ったか、説明せよ。

取り出した胸腺への放射線照射の影響を調べる必要があるので、正解は「出生直後のY系統マウスから胸腺を取り出し、適量の放射線を照射した。この胸腺を、胸腺を除去したY系統マウスに移植した。」である。実験1のX系統をY系統に変えればよい。正解率は予想以上に高く、7割ほどの生徒が正解していた。対照実験の趣旨が理解されており、喜ばしく感じた。興味深いのはこれ以外の解答である。「Y系統マウスに手術は行いが、何も取り出さない」、「Y系統マウスの胸腺を取り出し、放射線を照射しないで元に戻す」など、Y系統に関するものには部分点を与えた。ただし、「Y系統の胸腺を取

り除く」は0点とした。「X系統のマウスから胸腺を取り出し、放射線を照射せずにY系統に移植する」等、X系統からY系統への移植に関する解答も一定の割合で見られたが、これについては0点とした。

4. 計算問題

生物で扱われる計算問題がいくつかある。ここでは、ヘモグロビンの酸素解離曲線と腎臓の再吸収などについて述べる。

(1) ヘモグロビンの酸素解離曲線

次の問題は、ヘモグロビンの酸素解離曲線の定番の計算問題である。

動脈血の酸素濃度は100、二酸化炭素濃度は40で、静脈血の酸素濃度は30、二酸化炭素濃度は80である。動脈血の酸素ヘモグロビンのうちの何%が組織で酸素を解離するか。

動脈血の酸素ヘモグロビンの割合が95%、静脈血のそれが40%とすると、 $(95-40)/95 \times 100 \div 58$ が正解となるが、多くの生徒は $95-40=55$ というお決まりの間違いをする。ほぼすべての問題集に載っている問題なので、授業では扱うようにしているが、この問題の意義は何なのだろうかという疑問は払拭されなかった。数学ではなく生物学である。正解を答えて「わーい、うれしい」ではなく、その問題の生物学的意義を理解することに意味があるのではないだろうか。解離曲線がS字型をしているにはどんなメリットがあるかを考えさせる方が、はるかに意味深いことと思っている。

筆者は、次のような計算問題を出題している。

赤血球は血液の体積の45%を、ヘモグロビンは赤血球の重量の34%を占める。また、ヘモグロビン1gは1.4mLの酸素と結合できる。酸素の水に対する溶解度を0.3mL/100mLとすると、血液は水の何倍の酸素を運ぶことができるか。血液の比重を1.0とする。

答えは約70倍であるが、正解することが目的では

ない。70倍にはどのような意義を考えることで生命40億年のすごさを感じ取ってもらうのが目的である。生命活動が運ばれる酸素量に比例すると仮定すると、ヘモグロビンがないと活動量が1/70となる。歩く速度を時速4kmとすると、その1/70は60m弱となる。教室の端から端に移動するのに5分くらいかかるような話を入れることで、ヘモグロビンのすごさが伝わるのではと思われる。

ちなみに、酸素解離曲線を用いて計算力を問うものとして、定期考査や学力テストで次の問題を出題することがある。肺で酸素と結合するヘモグロビン量を求める問題は見たことがなく、筆者オリジナル問題である。

肺動脈を流れる血液と肺静脈を流れる血液とで酸素ヘモグロビンの割合を調べたところ、前者で20%、後者で96%であった。血液が肺を流れる間に、酸素と結合していないヘモグロビンのうちの何%が酸素と結合したか。

(2) 腎臓における水分の再吸収

再吸収量を求める計算問題も定番である。教育実習においても、ほとんどの実習生が扱い、1日180Lという答えを得意げに解説している。が、「この値の生物学的意義は何なの?」という問いに答えられる実習生はほとんどいない。「体の中のどこに180Lもあるんですか」という質問に対してはしどろもしどろとなるのが常である。

筆者は、「血しょう量は血液の1/2であるとする、この値は何を表しているか。」と問いかけている(血液量が5Lであることは算出済み)。グループディスカッション等を通して解答を導かせることで理解し、腎臓のすごさ・大切さを伝えるようにしている。(別件になるが、「何で“再吸収”、移動とか輸送ではなく吸収という語句を使うのは何でなの」という問いに対してしっかりと答えられた実習生は皆無であった。)

(3) 卵割

計算問題を通して現象を理解させる場合もある。卵割の授業において、「卵割は同調的に起こる」、「卵割によって生じた割球は成長しない」という知識を前提として、以下の問題を扱っている。

ある動物の卵は等黄卵であり、その直径は12.8mmであった。また、通常の体細胞(球形)の直径を調べたところ、25.0 μ mであった。受精卵は、何回卵割すると通常の体細胞の大きさになるか。

ほぼすべての生徒は、最初に9回($12.8 \times 1000 / 25 = 512 = 2^9$)と答える(さすがに512回と答える生徒はいなかった)。「これだと受精卵のスライス、端の細胞と中央の細胞の形が違うのになるよ」とアドバイスすると、それに関しては納得するが、じゃあどうしてよいかは思いつかない。「1個のバスケットボールの中に何個のピンポン玉が入るかを求めるにはどうすればよいか」というヒントを出すと、解決へのイメージが少しづつ湧いてくる(球の体積を求める公式を思い出せない生徒がちらほら)。ちなみにこの問題の趣旨は、「生じた割球は成長しないなら、段々小さくなっていくんじゃないですか。」という質問に対する答えでもある。卵細胞が通常の大きさに戻るのが卵割である。加えて、卵細胞には卵割に必要な栄養(卵黄)が含まれており、他の動物にとっては非常に栄養価の高いエサとなる。卵割の細胞周期が短いのは、早く敵から逃げられる体をつくるようにするためであると説明すると、卵割の意義の理解が深まるとと思われる。

5. モデル化

学習内容の理解を深めるためなどに、モデル化した教材を提示することがある。次の3つについて紹介する。

(1) 遺伝子突然変異

生物基礎ではコドン表の読み取りは発展として扱

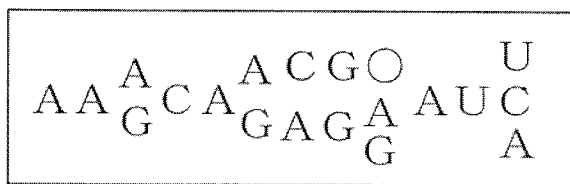
われている。しかし、筆者は「ここまで勉強したんだから、これもやらないともったいない」という意味を込めて扱っている。その際、読み取りの練習に用いているのが次の例題である（生物基礎としては発展の発展になるのかもしれないが）。

一方の鎖の塩基配列が次のようなDNAがある（これをDとする。）

TTCAGTTGCATAGGA...

- 1) Dを転写したときのmRNAの塩基配列は？
- 2) このmRNAをもとに翻訳されたタンパク質のアミノ酸配列は？
- 3) Dにおいて、左から11番目の塩基がCに変わった。このDNAを転写、翻訳して生じるタンパク質では、左から「ア」番目のアミノ酸が「イ」に変化する。
- 4) Dに、ある突然変異が生じた。これを転写、翻訳したところ、リシン・グルタミン・アルギニン・イソロイシン ……というアミノ酸配列のタンパク質が生じた。Dで起こった突然変異は？

1)～3)は、これまでの内容が理解されていれば、簡単に求めることができる。4)は、まずは可能性のある塩基配列をすべて書き出させることから始める。(○は4種類すべての可能性あり)。



次に、これと2)（下図）とを比較させる。



ここから先は、にらめっこ。上と下を比較して、違うところを見つけ出すしかない。鋭い生徒は、このままノーヒントで5分くらいで正解するものが現れる。しばらく様子を見た後、ヒントとして提示するのが次の英文である。

Why did you get the tie for him ?

すべて3文字の単語であるのがポイントである。単語と単語の間は意図的にスペースを取っていないが、ほとんど生徒が正確に訳することができる。これが2), 突然変異前のRNAに相当する。この後、次の英文を提示する。

Why did you get the tie for him ?

CIEとは、国際照明委員会である。意味としては通じないが、文法的には間違いではない。これが3)の、1つ置換した突然変異に相当する（TがCに変わっているところが芸が細かい）。次が最後のヒントである。

Why did you get the tie for him ?

これを見たときの生徒の反応は、見事に2つに分かれる。何を意味しているのかすぐに気づく生徒、どれだけ見ても分からない生徒。

生物基礎では、発展でも扱われないフレームシフト突然変異であるが、DNAの変異の仕方によっては大変なことが起こることが理解できるであろう。

(2) 予定運命の決定

近年、その扱いが少なくなってきたが、スーパーマンの交換移植による予定運命の決定は、古典的な実験である（図7 東京書籍 生物（2・東書・生物301）を改）。

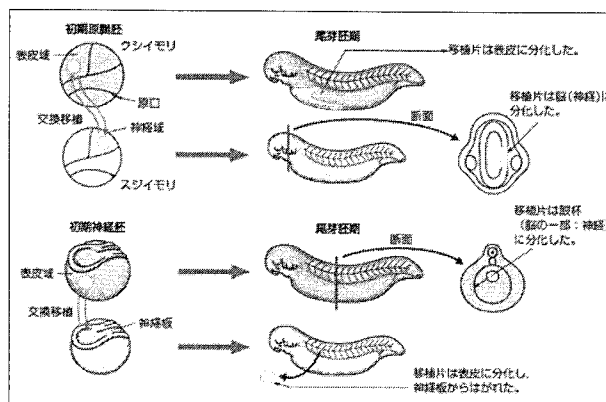
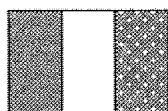


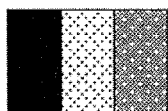
図7

これを学習した後、次のような国旗をモデルとした問題を出している。

フランスの国旗は左から青、白、赤であり、
ベルギーの国旗は黒、黄、赤である。



フランス国旗



ベルギー国旗

はじめ白色の布であったものが、時間が経つにつれてそれぞれの旗に変化していくとすると、次の交換された布片は、予定運命の決定前、決定後でそれぞれ何色になるか。

ア) フランス国旗の予定青域を切り取って、
ベルギー国旗の予定黄域に移植

イ) ベルギー国旗の予定黄域を切り取って、
フランス国旗の予定青域に移植

決定前のア = A 決定前のイ = B

決定後のア = C 決定後のイ = D

これは、Wolpertが提唱したフランス国旗モデル
(図8 柴谷篤弘著『発生現象の細胞社会学』講談

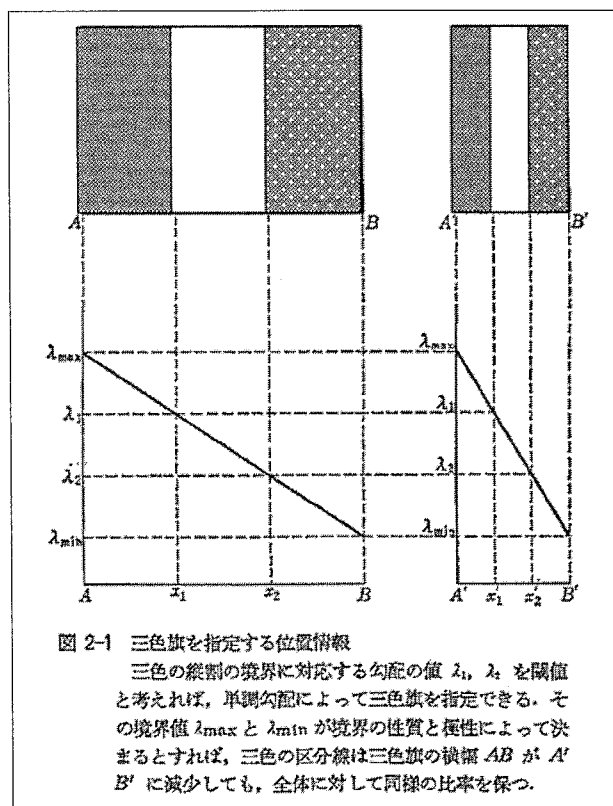


図8

社 旗の塗りつぶしパターンは、本文の図に合わせるように変更した) を元に、筆者が予定運命に応用したものである。

思考力を養うために、フランス国旗に似ているベルギー国旗を用いている。決定後のCは青、Dは黄になるのは明らかなので、これに関してはすぐに答えを与えている。

さて、AとB。「できたら言いに来て」というと、ほぼ全員が一斉にドヤ顔または「こんな簡単な問題答えさせるって、バカにしとるやろ」顔で、Aを黄、Bを青と答える。「そんな簡単な問題、出すはずない」というと、あちこちで議論が始まる。これも、短かければ数分で答える生徒がいる。一方で、泥沼に嵌って出られなく生徒も多い。ヒントとしては、「図をよく見ること。クシイモリの皮膚の中にスジイモリの皮膚が混ざっているよ」というと、ようやく理解する生徒がいる一方で、どうしても泥沼から抜け出せない生徒も少なからずいる(こういう生徒は、答えを教えても納得いかない場合が多かったりする)。

(3) 葉っぱの経済学

生物の多様性と生態系の分野は、それこそ事実の羅列のオンパレード、どうしたら生徒を楽しませることができるかに悩まされるところである。「湿原で有名な尾瀬は3つの県にまたがっている。どこことどこでしょう」、「レッドデータブックには野生絶滅という項目がある。これに該当する生物は?」、「絶滅キグ種って、ちゃんと漢字で書けますか」などなどの雑学で興味を引いている。

筆者は以前より、「暖かいと常緑樹、少し寒くなると落葉樹が生育するのは理解できるが、さらに寒くなると再び常緑になるのは何でだろう?」という疑問を抱いてきた。これに対する1つの考えが『葉の寿命の生態学』(菊沢喜八郎著 共立出版)に書かれている。筆者は、これを元に、自分なりの修正を加味して次のような授業を行っている。

暖温帯には常緑の照葉樹が、冷温帯には落葉の夏緑樹が生育する。冷温帯で冬に落葉する方が有利なモデルを考えよう。さらに、冬が長く厳しい亜寒帯で、落葉よりも常緑が有利となる条件、モデルを考えよう。

- ・1年を、光合成に適した季節（夏）と光合成に適さない季節（冬）の2つに分ける。横軸に時間、縦軸に葉からの有機物の供給量（みかけの光合成量）をとり、グラフを作成する。
- ・暖かさの指数を元に、平均気温が5℃以下の月を冬とする。該当する地域の気象データより、暖温帯、冷温帯、亜寒帯の冬の期間は、それぞれ2カ月、4カ月、6カ月となる。
- ・葉は、植物体の有機物を用いて作られる。すなわち、このときの葉からの有機物の供給量はマイナスの値をとる。葉を作るのに要する時間は、年に対して0とみなせる。
- ・照葉樹の葉は厚く、夏緑樹の葉は薄い。葉を作るのに必要な有機物量を、照葉樹で-3、夏緑樹で-1、針葉樹で-2とする。
- ・暖温帯におけるみかけの光合成速度を、夏は相対値1、冬は相対値-1とし、これを基準に冷温帯夏を3/4、冷温帯冬を-3/4、亜寒帯夏を2/3と仮定する（亜寒帯冬は後述）。

まずは基本となる照葉樹である。葉をつける夏の始めを1年の始めとする（以下同じ）と、照葉樹におけるグラフは、図9のようになる。

次に、冷温帯を考える。はじめに常緑の葉を仮定する。葉を作るのに-3の有機物が必要かつ冬のみかけの光合成速度が-3/4なので、図10-1のようなグラフになる。では、薄く落葉する葉のグラフはどうなるであろう。-1から始まり、8カ月間傾き3/4で増加する。冬は落葉するので、みかけの光合成速度は0となる。2年目以降も毎年新たに-1を出費して葉を作らなければならないが、冬に葉をつけたままの維持費（-3/2）よりも少なくてすむ

（図10-2実線、破線は図10-1に同じ）。冷温帯では、常緑よりも冬に落葉した方が有利であることが分かる。

さて針葉樹。まず、薄い葉を作って冬に落葉すると仮定した場合、グラフは図11-1のようになり、次年の葉の作成コストと合わせると、毎年の収支は1となる。これを上回る常緑の葉を考えなければならない。ポイントは冬のみかけの光合成速度である。これまでのように、夏の値にマイナスを乗じた-2/3としたグラフが図11-2である。1年の半分が夏、半分が冬なので、これだと1年間の収支が0になって全く成長できない。落葉（破線）との比較以前の問題である。みかけの光合成速度を-1/3とすると、毎年の収支が1となるが、これは落葉の場合と変わらず、常緑であるメリットがない（図11-3）。-1/6としたグラフが図11-4である。4年目終了時点で落葉の場合と等しくなり、5年目以降で落葉を上回るようになる。亜寒帯で常緑になる条件は、「冬における耐寒性が照葉樹の6倍、葉の寿命が5年以上」というモデルを得ることができる。

夏冬のみかけの光合成速度等、前提条件として考慮しなければならない点は多々ある。また、針葉樹のモデル作成にあたって、どこまで生徒に考えさせるか（当授業は生物基礎で行っており、針葉樹に関してはほとんど解説するのみである。次期学習指導要領にある「見出して理解すること」として、理科系生物選択の生徒にディスカッションせるとどうなるか興味がある）等の課題はあるが、こう考えると説明がつく程度には理解が深まっているであろう。

6. 終わりに

どうしたら暗記から脱却できるか、どうしたら生物学的に探究する能力を育てることができるか、どうしたら生物学で楽しませることができるかに頭を縋り続けた30数年。少しでも、本稿を読んだ方のお力になれば幸いである。

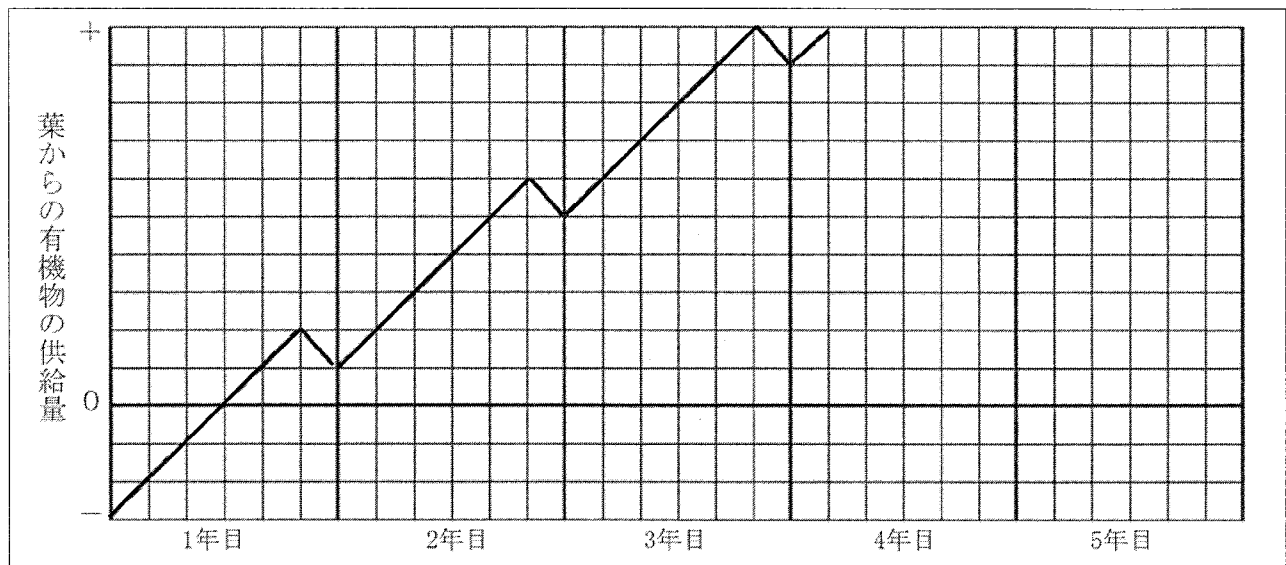


図9

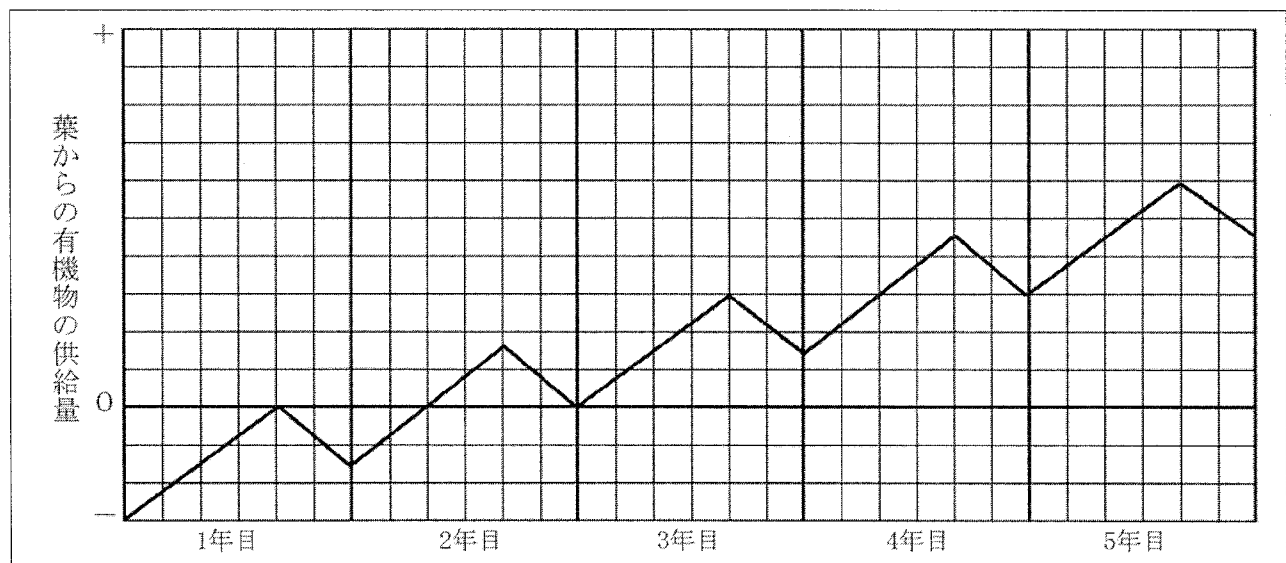


図10-1

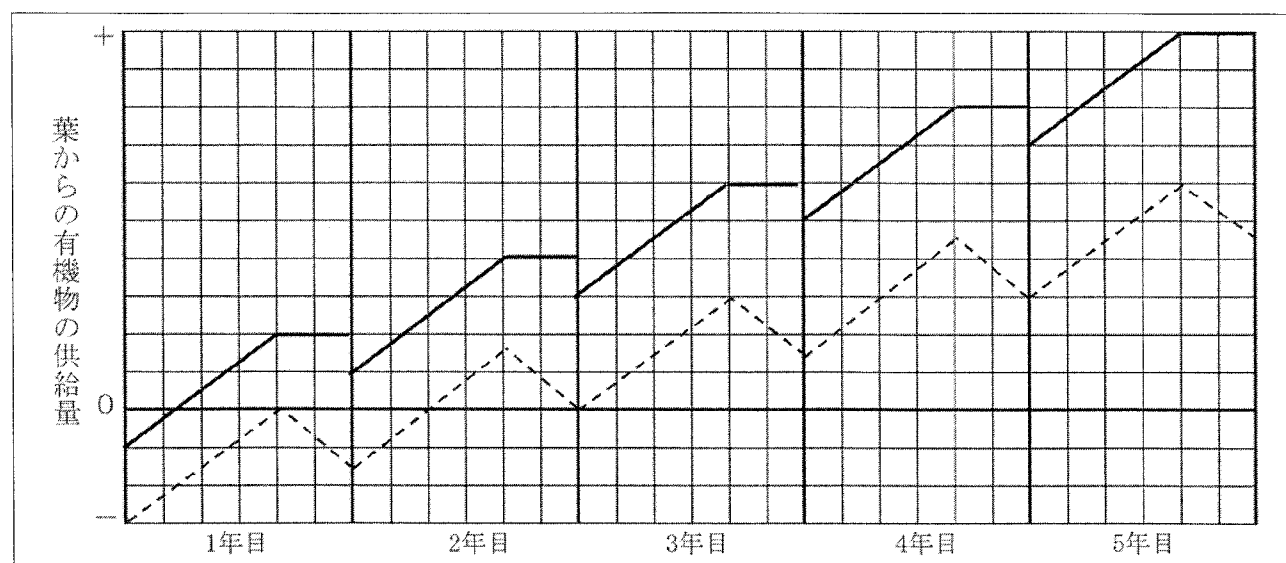


図10-2

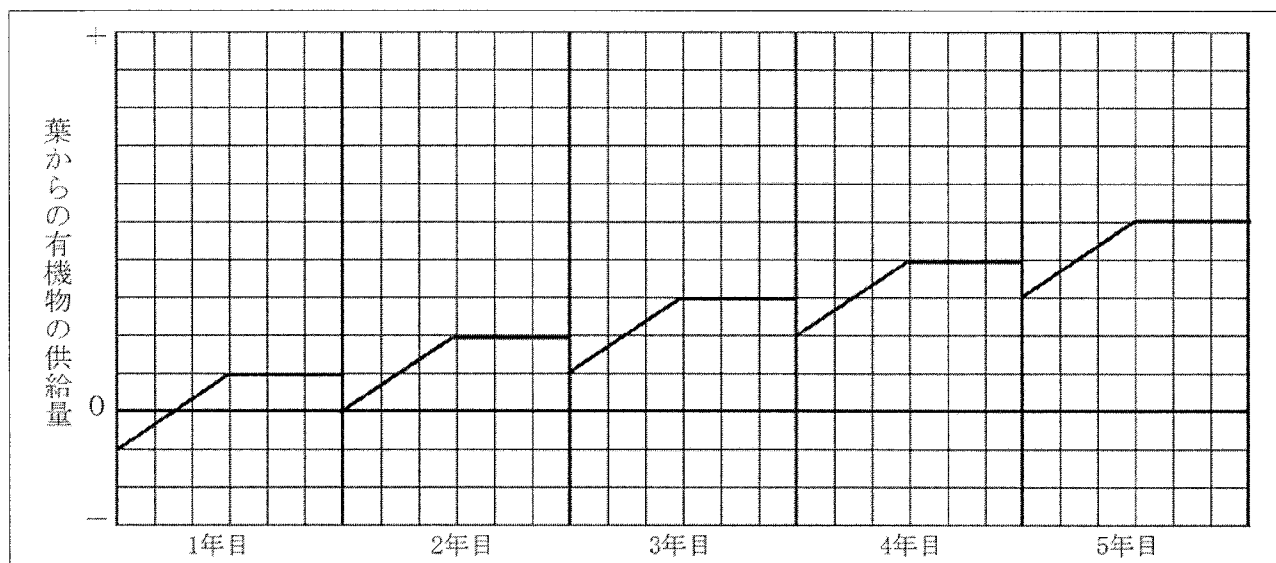


図11-1

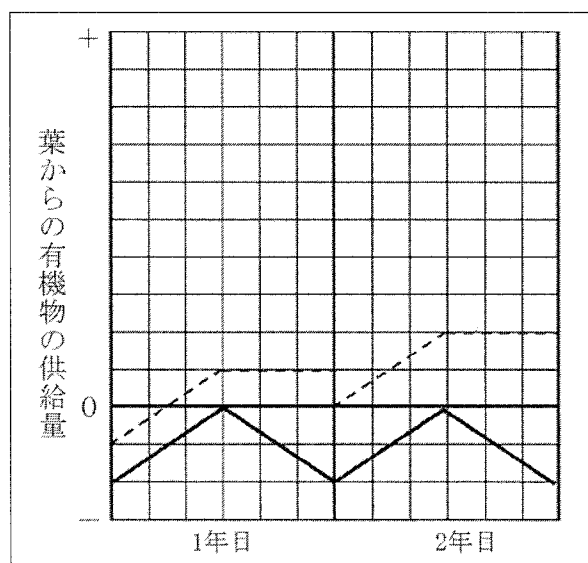


図11-2

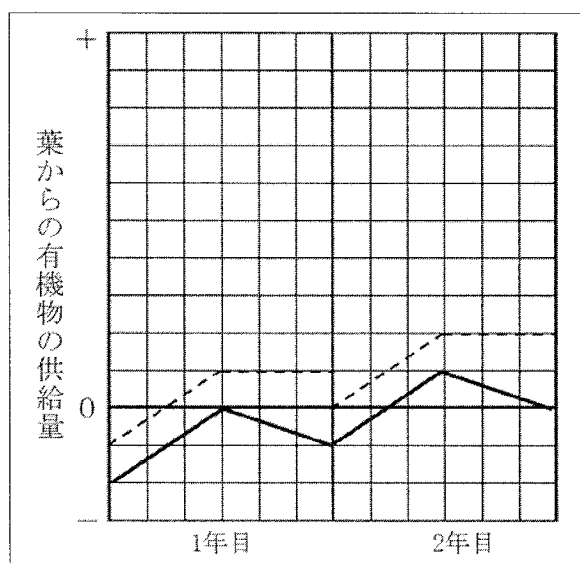


図11-3

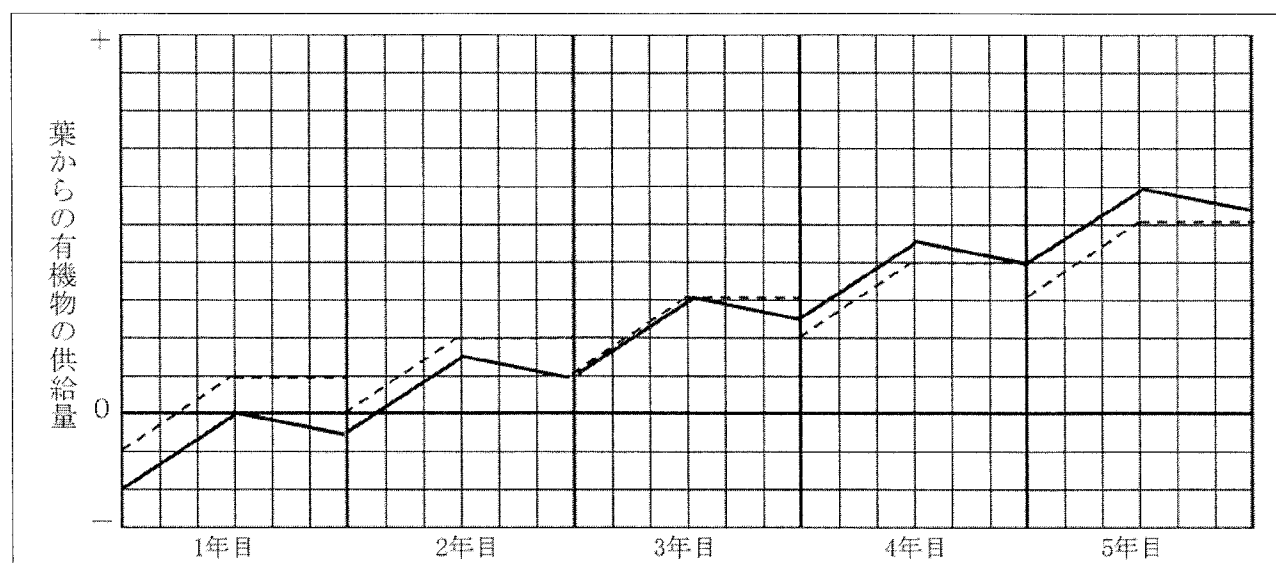


図11-4