

骨から見える生命の神秘

～ニワトリ透明骨格標本を活用した発生のイントロダクション～

齋藤 昂 良

神奈川県立湘南台高等学校

1. はじめに

たった1個の細胞からなる小さな受精卵から、複雑な機能と形態を持った成体がつくりあげられていく発生のダイナミクスは、古くから人々を魅了してやまなかったが、いまでは、発生現象とその仕組みについて、生物学者のみならず、高校生でも詳細に知ることができる。

近年の研究によって、発生初期から器官形成期における胚の形態学的変化が明らかになるのみならず、その仕組みが遺伝子の制御によるものであることが明らかになりつつあり、高等学校「生物」の学習においても、これらの遺伝子や分子に着目した、いわば分子発生的内容が中心となりつつある¹。

著者は、生徒の興味関心を高めるには、実物を見せて体感させることが有意義であると考えている。このため、発生の単元において、初期発生の導入等として、生徒にとって身近な素材であるニワトリの胚透明骨格標本を観察させることで、発生現象に興味・関心を持たせ、その後の分子的理解につなげる授業を展開している。

2. ニワトリ胚透明骨格標本の作製（材料と方法）

ニワトリ胚透明骨格標本は、内山らの方法²を一部改変して作製した。

ニワトリ胚

養鶏場より入手した有精鶏卵を37℃恒温槽内に転卵せず静置した。恒温槽内の湿度を高く保つため、純水を入れたビーカーを恒温槽内に設置した。

解剖と固定（アルシアンブルーによる1次染色）及び脱水

所定の日数が経過したニワトリ胚を卵から取り出し、ピンセットで眼球及び消化管（特に肝臓はしっかりと）を丁寧に取り除き、固定液（99.5% エタノール800 mL、酢酸200 mL、アルシアンブルー液pH 2.5（#013-13801, Wako）7.5 mL）に沈めて1晩静置した。

固定液を捨て、胚を99.5% エタノールに浸して1晩静置した。翌日、新しい99.5% エタノールに液交換した。エタノールによる脱水を3日間繰り返した。

染色（アリザリンレッドによる2次染色）と透明化

胚を骨化組織染色液（水酸化カリウム5g、アリザリンレッドS（#0112-4230,SHOWA）100mgを純水で1Lにしたもの）に沈めて6時間ほど反応させた（ときどき胚を光に透かして染色の具合を確かめながら、全体に白っぽい部分がなくなるまで反応させた）。胚を染色停止液（グリセロール200mL、水酸化カリウム10gを純水で1Lにしたもの）に沈めて16時間ほど反応させた（胚の表皮の青色が抜け、透明になるまで反応させる）。この後、胚を50%グリセロールに沈めて1晩置き、翌日新しい50%グリセロールに液交換した。この後2週間程度できれいな標本になった（図1）。



図1. ニワトリ胚透明骨格標本（6日胚から11日胚）

軟骨はアルシアンブルーで青く染まり、硬骨はアリザリンレッドで赤く染まる。発生の進行にともなって、胚の大きさが劇的に変化することや、硬骨が形成されていく様子（7日胚頃までは青一色で軟骨のみだった骨が、8日胚頃から骨の中央部に赤い部分つまり硬骨ができはじめる）を観察することができる。

3. 授業展開

本単元（生殖と発生）の前半は、染色体と減数分裂による遺伝子の組合せについて学習を進めている。新課程になって、メンデル遺伝について高校では扱わなくなったため、現象としての遺伝学については高校ではほとんど扱っていない。しかし、遺伝子（DNA）の子孫への受け渡しと遺伝的多様性については詳しく取り扱うことになっているため、メンデル遺伝の復習を含めた減数分裂における染色体の動きについての学習を進めている。この分野は、残念ながら苦手意識を持つ生徒が多くおり、発生現象への興味関心を失って

しまう生徒も少なからず存在する（ただし、理解してしまえば最も面白いと感じてもらえる分野の一つである）。そこで、本単元の中盤で扱う動物の初期発生の導入においてニワトリ胚透明骨格標本の観察をさせ、発生のダイナミズムを体感してもらい、動物の発生についての興味関心をあらためて高めたうえで、ウニ・カエルの初期発生の詳細について学習を進めている（表1）。

ニワトリ胚透明骨格標本の観察の授業では、導入として、①ニワトリ胚発生の概要、②卵黄への血管の発達、③透明骨格標本の染め分け（硬骨・赤、軟骨・青）について説明する。この際、図2に示すような、発生中の写真を見せながら説明し、観察に向けての興味を持たせている。次に、展開として、6日胚、7日胚、8日胚、9日胚、10日胚および11日胚を各1匹ずつ各班（4人／班）に配布して、観察させている（胚は1匹ずつ50%グリセリンで満たしたスチロール瓶に保存してある）。まず標本を発生段階順に並べさせて観察させ、全体の経時的変化を確認させている。次に、骨形成、とくに硬骨化に着目させて観察させている。スケッチは任意の4ステージについて行わせているが、最低2ステージのスケッチができればよいことにしている。スケッチさせる際には、「スケッチは、絵のうまい下手ではない。」「現象を“あるがまま”に記録することがスケッチである。」「“あるがまま”とは、例えば、背骨の数は何本、などのことである。」とスケッチのポイントについて触れ、

表1. 単元の授業計画（第4章「生殖と発生」（使用教科書：数研出版・高等学校 生物）

第1回	染色体の構造・染色体と遺伝子
第2回	遺伝情報の分配・減数分裂①
第3回	減数分裂②
第4回	〔補〕メンデルの遺伝の法則①
第5回	〔補〕メンデルの遺伝の法則②
第6回	減数分裂・受精による遺伝子の組み合わせ
第7回	検定交雑・組換え価・染色体地図
第8回	動物の配偶子形成・受精
第9回	卵の種類と卵割
第10回	ニワトリ胚透明骨格標本の観察
第11回	ウニの発生
第12回	カエルの発生①
第13回	カエルの発生②・胚葉の分化
第14回	細胞の分化と形態形成
第15回	形態形成を調節する遺伝子
第16回	植物の発生
	定期試験

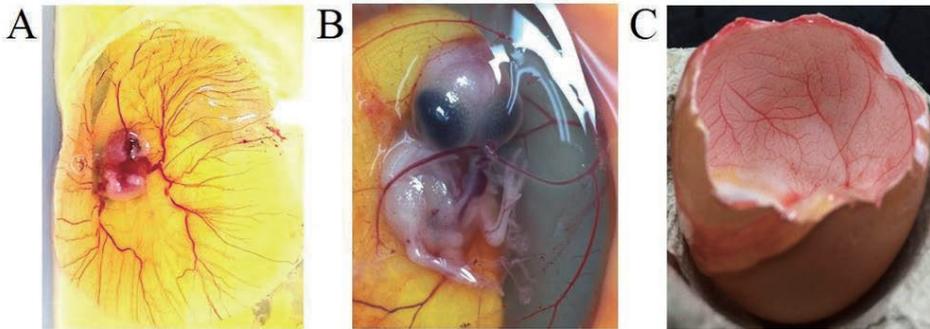


図2. 発生中のニワトリ胚

シャーレにあけた5日胚 (A) および9日胚 (B)、9日胚を取り出したあとの卵殻 (C)。 (A) (B) では卵黄に伸びる血管をはっきりと確認することができる。また、心臓の拍動の様子も観察できる。(C) では、卵の内側に満遍なく血管が張り巡らされている様子を確認することができる。

表2. 「ニワトリ胚透明骨格標本の観察」の授業計画

時間	生徒の活動	教師の指導
<導入> 5分	<ul style="list-style-type: none"> ・ニワトリの発生について知る ・血管の意味を知る ・透明骨格標本について知る (青: 軟骨、赤: 硬骨) 	<ul style="list-style-type: none"> ・写真を用いて、ニワトリ胚の発生についての説明をする。 ・標本の染め分けについて説明する。
<展開> 40分	<ul style="list-style-type: none"> ・まずは標本を並べて、全体の経時的变化を知る ・4つのステージを選択して、スケッチする。 ・骨の発生の様子を理解する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・観察のポイントを指示する。 ・机間指導で、適宜観察の要点などを指示する。 ・スケッチ終了までの残り時間を適宜アナウンスする。
<まとめ> 5分	<ul style="list-style-type: none"> ・発生では短時間で大きな変化をすることを理解する。 ・ヒトの発生にも思いを巡らせ、妊娠初期が胎児の成長にとって重要であることを理解する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒトの発生もニワトリ同様であることを紹介し、妊娠初期が胎児の発生において最重要であることを説明する。

とにかく丁寧に観察することを心掛けるように指導している。生徒も、このポイントをきちんと守り、それぞれ丁寧に観察し、スケッチをまとめている (図3)。観察のまとめにおいて、発生の過程では胚が短時間で大きな変化を起こすことを理解し、ヒトの発生においても、初期にはニワトリと同様の形態学的変化が起こること、また、妊娠4週から7週までの間で器官形成が劇的に進むため、妊婦のおなか膨らむ前が、胎児にとっては最も大切な期間であることを認識させている (表2)。この学習を通じて、脊椎動物の器官形成期の発生についての知識を得るのみならず、よき市民となるための考察 (妊娠中、とく

に妊娠初期の飲酒・喫煙・過度なストレスが胎児に及ぼす影響について考察する)も同時に行うことで、「いのちの授業」として、本校が組織的に取り組んでいる広義のシチズンシップ教育の実施につなげている。

ニワトリ胚透明骨格標本の観察を通じて、発生現象についての興味関心を高めたのちに、本単元の後半であるウニ・カエルの初期発生について学び、遺伝子による発生現象の制御についての学習を進めている(表1)。本単元(生殖と発生)の学習を通じて、有性生殖における減数分裂や受精によって、個体や集団に遺伝的多様性が生じること、また、遺伝子が設計図ではなく生命を制御する「プログラム」であり、その「プログラム言語」はDNAのATGCの4文字で書かれており、さらにこれは全生物で共通しているということを理解させることを目標としている。

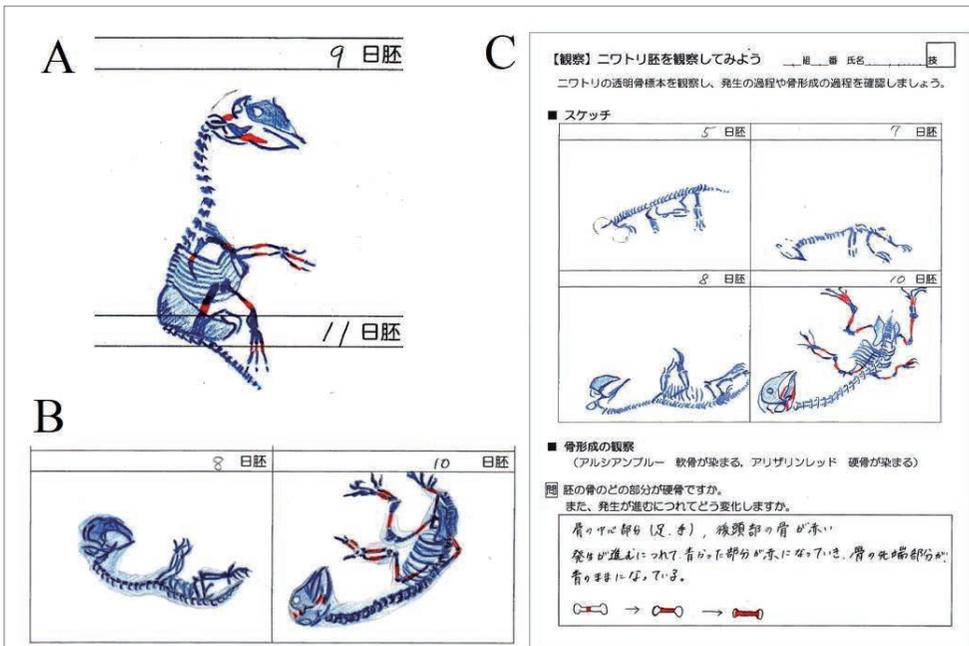


図3. 生徒のスケッチ

9日胚のスケッチ(A)、8日胚および10日胚のスケッチ(B)及び実験レポート全体(C)。いずれも異なる生徒の実験レポートより転載した。(A)丁寧かつ一生懸命に観察した結果、枠をはみ出してしまっている。(B)胚の経時的变化をしっかりと観察している。(C)観察や考察課題に非常に意欲的に取り組んでおり、完成度も高い。

4. 本教材の効果

生徒に提出させた観察レポート及び授業後に行った生徒アンケートの集計により、本教材を用いた授業が、動物の発生に対する生徒の興味関心を高めることができ、また本単元への学習意欲が高まることがわかった(図3、表3)。また、生徒アンケートの「教科書に載っ

ていない発生現象について調べてみようと思った」との質問項目に対し、約62%の生徒が「強く思う・思う」と回答しており（表3）、著者が生物の授業で目指している目標の一つである「教科書の先にある生物学に関心を持つようになる」について、期待以上の効果を有することがわかった。また、アンケートの自由記述にも「発生の面白さを知った」、「生きる・育つということに深い意味を感じました」、「はじめは小さく骨も弱いのに日に日に骨は強くなり大きくなっていく姿に生命の力強さを感じました」などの意見があり、生徒の科学的な生物観の育成にも寄与することがわかった（表3・自由記述）。

表3. 授業後の生徒アンケート結果

	強く思う	思う	思わない	全く思わない
発生のドラマを感じた	45.0%	48.3%	5.0%	1.7%
生命のすごさを感じた	71.7%	25.0%	1.7%	1.7%
発生のメカニズムに興味を持った	40.7%	52.5%	3.4%	3.4%
発生の勉強を頑張ってみようかと思った	39.0%	49.2%	10.7%	1.7%
教科書に載っていない発生現象について調べてみようと思った。	6.7%	55.0%	35.0%	3.3%
教科書に紹介されている「ウニ」「カエル」だけでよかった	10.7%	6.7%	51.7%	31.7%
<<自由記述（抜粋）>> ・なかなか見れるものではないし、骨を見るのが好きなので楽しかった。 ・教科書で見るとよりリアルで面白かったです。 ・「生きる」「育つ」ということに深い意味を感じました。 ・1日の成長スピードがはやくて驚いた。 ・ニワトリに関しては私達が食べる動物でもあるので、より身近に感じた。 ・発生のスピードがこんなにも速いんだと知れたので、よかったです。 ・発生のおもしろさを知った。 ・不思議な現象を実際に見る機会が与えられてとてもよかった。 ・はじめは小さく骨も弱いのに日に日に骨は強くなり大きくなっていく姿に生命の力強さを感じました。				

(n = 60)

5. 考察

生物の特徴（他の物質と大きく異なる点）は、①細胞からなること、②代謝し共通のエネルギー通貨としてATPをもつこと、③DNAを遺伝物質として持ち自己複製能力があること、④恒常性をもつこと、などである。「生殖と発生」の単元は、これまで学習してきた「生命現象と物質」の内容（生体を構成する分子、細胞の構造、呼吸・光合成、遺伝情報の発現）をうけて、それらの知識を統合してシステムとして生命を理解する、生物の教科書ではじめて出てくる「生物らしい」内容である。また、この分野の研究（とくに分子レベルでの発生現象の解明）は、第二次世界大戦以降急速に進んでおり、iPS細胞など再生医療の発

展をはじめとして、我々の日常生活にも多大な影響と貢献を与えている。このため、生殖と発生の単元は非常に身近であり、また「生命とは何か」について科学的に考えていく第一歩となる、生物学の興味深い世界へのゲートウェイとなるべき単元である。しかしながら、本単元は、ややもすると用語の羅列と暗記の洪水になってしまい、生徒が生物学を忌避するきっかけにもなってしまう。このため、本単元の指導にあたっては、用語の暗記ではなく、生命現象としての発生成に興味を持たせ、その関心を維持することが重要である。

そこで、著者は生徒にとって身近な素材であるニワトリを用いた、ホンモノの標本を観察させている。まさに「百聞は一見に如かず」で、実際に標本を観察することで発生現象に対する生徒の興味・関心が非常に高くなるようである。なお、本校ではこの生殖と発生の単元を2学期後半に学習して期末テストを行うが、その後の1月下旬から2月初旬にかけてバフンウニの人工受精の実験を行い、ウニの初期発生も実際に観察させている。一生懸命に覚えた胚の変化や名称等の知識を基にして、実際の発生現象を追いかけることができ、生徒たちは大興奮である。何よりも、受精の瞬間（正確には受精膜があがり始める瞬間）を目の当たりにすることが、最も生徒を感動させていた。

このように、生徒に「実物」を見せることで、いま学習している内容が自分たちから遠い宇宙で起きていること、また教科書上でのフィクションではなくて、いままさに、自分たちの身のまわりで起きている（自分にも起きてきたことであり、自分の子に起きることだ！）ということに気付かせることができ、それは生物の教科の垣根を超えて、「いのちの学習」として広義のシチズンシップ教育にもつなぐことができるのではないかと考えている。

著者は、理科の授業では、実験・観察を重視し、教科書の事象を身近な事象に関連付けて考察させることが非常に重要であると考えているが、その理由について考察していきたい。

平成21年（2009年）に改訂され、理数教科では平成24年度入学生（それ以外の教科は平成25年度入学生）から実施されている高等学校学習指導要領では、「学力の3要素（基礎的・基本的な知識・技能、知識・技能を活用して課題を解決するために必要な思考力・判断力・表現力等、主体的に学習に取り組む態度）」を明確に示すとともに、「理数教育の充実」が明確に謳われており、我が国が「科学技術立国・日本」を本格的に目指していくという意欲が示されている。学習指導要領改訂の基本的な考え方は、①改正教育基本法等を踏まえた学習指導要領の改訂、②「生きる力」という理念の共有、③基礎的・基本的な知識・技能の習得、④思考力・判断力・表現力等の育成、⑤確かな学力を確立するための必要な時間数の確保、⑥学習意欲の向上や学習習慣の確立、⑦豊かな心や健やかな体の育成のため

の指導の充実、の7点である³⁻⁵。

2011年に行われた国際数学・理科教育動向調査（TIMSS2011）では、日本の中学2年生の理科問題の平均得点は558点であり、シンガポール（590点）、台湾（564点）、韓国（560点）に次いで第四位であり、統計上の誤差を考慮するとシンガポールより有意に低く、台湾、韓国、フィンランドと同程度であり、スロベニア、ロシア、香港、イングランド、アメリカ以下の全ての参加国／地域より有意に高いことが報告されている⁶。しかし、「理科の勉強は楽しい」の設問に対する回答は、強くそう思う（日本20.3%、国際平均値45.1%）、そう思う（42.4%、35.0%）、そう思わない（28.2%、12.8%）、まったくそう思わない（9.1%、7.1%）であり、「私は、理科が好きだ」の設問に対する回答は、強くそう思う（18.2%、42.5%）、そう思う（34.3%、33.0%）、そう思わない（31.8%、15.2%）、まったくそう思わない（15.7%、9.3%）であり、「理科への自信の程度」の設問に対する回答は、理科に自信がある（3%、20%）、理科にやや自身がある（28%、49%）、理科に自信がない（69%、31%）であって、いずれの設問に対しても、国際平均値よりも低いことが報告されている⁶。これらのことから、理科の基礎的知識や考察力はあるが、理科の勉強が楽しいと思う生徒が国際平均よりも少なく、依然として「理科嫌い」の現状は改善されていないことが推察されている。

中央教育審議会は、平成26年12月22日の答申のなかで、次の学習指導要領の在り方について述べており、その目玉の一つとして「アクティブラーニング；AL（児童・生徒が課題解決に向けて主体的・協働的に学ぶ学習）」をあげている⁷。理科の学習に関係するALのキーワードは、「汎用的能力、能動的学習、主体的・協働的な学び、問題解決学習、問題の発見、体験学習、話し合い活動」等であると考えられる⁸。

以上のことより、これからの理科教育の課題は、理科を主体的に学ぼうとする「理科好き」生徒の育成、協働的な学習、プレゼンテーションの技術をはじめとしたコミュニケーション能力の育成であると考えられる。このため、理科では、①生徒参加型の授業により、生徒に「体験させる」、②生徒の言語活動を充実させた授業を展開することにより、生徒に「考えさせる」、③生徒の意見を発表させる機会を用意し、生徒の「伝える」能力を育成する、といった授業を展開していくことが必要である。著者は、生徒のこのような能力を高めるためには、知識の羅列や、大学入試問題の演習といった授業ではなく、実験・観察を重視し、教科書の事象を身近な事象に関連付けて考察させることが非常に有用であると考えている。イタリアの物理学者であるガリレオ・ガリレイは「人にものを教えることはできない。自ら気付く手助けができるだけだ。」と述べているが、理科教育にあっても、生徒が自ら体験し・感じ・考え・伝えることを大切にしていきたい。

6. 謝辞

ニワトリ胚透明骨格標本の作製にあたって、北里大学理学部生物科学科幹細胞学講座助教の内山孝司博士にご指導・ご助言を賜りました。深く感謝いたします。

また、校内での作製に当たりご協力頂きました実習指導員の西城寿美子先生、自然科学部部員の小高くるみさん（現日本大学生物資源科学部2年生）・岩壁瑠那さん（3年生）、数学科の木村梢先生、国語科の伊賀勇介先生に、深く感謝いたします。

参考文献

1. 数研出版（2014）『高等学校・生物』
2. 内山孝司「8-10日目ニワトリ胚の骨標本作製（実習テキスト）」
3. 文部科学省（2009年）『高等学校学習指導要領』
4. 文部科学省（2009年）『高等学校学習指導要領解説・理科編』
5. 清原洋一（2013年）「中・高等学校の理数教育の最近の動向」応用物理学会春季学術講演会講演予稿集、巻60、5-10
6. 文部科学省「IEA国際数学・理科教育動向調査の2011年調査（TIMSS2011）」
7. 中央教育審議会答申（2014年）「新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育、大学教育、大学入学者選抜の一体的改革について～すべての若者が夢や目標を芽吹かせ、未来に花開かせるために～」
8. 教育出版教育研究所（2015年）「理科教育とアクティブラーニング」『教室の風』No.436