

カエル原腸胚切断面観察の実践的研究

(理科教育講座) 中村 依子

(愛媛大学教育学部) 安平 奈央

(理科教育講座) 向 平和

(愛媛大学名誉教授) 日詰 雅博

Practical research on the observation of the bisected gastrula of the frog

Yoriko NAKAMURA*, Nao YASUHIRA*, Heiwa MUKO and
Masahiro HIZUME

*二人の著者がこの研究に同等に貢献した

(2020 年 9 月 1 日受理)

抄録：高等学校学習指導要領解説（文部科学省、2018）の「発生と遺伝子発現」では、「発生と遺伝子発現についての観察、実験などを通して、遺伝子の発現調節、発生と遺伝子発現について理解させ、それらの観察、実験などの技能を身に付けさせるとともに、思考力、判断力、表現力等を育成することが主なねらいである。」と明記されている。カエルの発生において、原腸形成は体の構造の基本となる外胚葉、中胚葉、内胚葉が形成される重要な形態形成運動であり、実物のカエルの胚の内部構造を観察することは重要であると考えられる。しかし、胚発生の実験観察は、時間が掛かりすぎること、卵が小さすぎて生徒の実験技能では不可能なことから、高校生物において観察、実験を行うことが難しいとされている。そこで本研究では、アフリカツメガエルの原腸胚を用いて、実験時間を短縮し、かつ確実に胚の内部を観察できる教材と指導法を開発した。大学生を対象として、実体顕微鏡を用いて剃刀で胚を切断し、その断面を観察、スケッチさせる予備実践を行った。予備実践での課題を改善し、写真を用いて胚の内部構造を測定する授業実践を行った。胚の向きを揃えた寒天ブロックを作製し、模型を用いて寒天の切断法を細かく指示したところ、全員が 1 回で観察可能な切断胚を作製できた。さらに観察に切断胚の写真を使うことにより、学生が切断胚をうまく作製できなかった場合でも胚の切断面を観察することができ、時間を掛けずに様々な段階の胚の切断面を観察することが可能であると考えられた。また、授業実践後の質問紙調査の自由記述の結果から、「カエルの発生」の授業において、生徒にとって分かりやすく、興味・関心を引くためには、実物を観察することができる顕微鏡観察が必要であることが示唆された。

Abstracts: The curriculum guidelines for high schools (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2018) states "In the study unit 'Development and Gene Expression,' the main aims are to have students understand the control of gene expression, and development and gene expression, to acquire the techniques for observations and experiments, and to foster the abilities of thinking, judging, and explaining through observations and experiments on the development and gene expression". As gastrulation is an important morphogenetic movement for the formation of

ectoderm, mesoderm and endoderm which makes the basis of the body structure in the frog development, it is important to observe the internal structures of real embryos. However, as it takes too much time and the small size of the embryo makes it difficult for students to do experiments and observations for the embryonic development, it has been considered that doing experiments within the high school biology class setting is impossible. In this study done with college students, we developed teaching materials and a method for the observation which could reduce the experimental time, allowing students to successfully observe the internal structure of the gastrulae of *Xenopus laevis* for themselves. First, we investigated whether college-level students could bisect the gastrula with a razor, observe the bisections, and make sketches. We identified and resolved problems in this preliminary lesson practice, and then implemented the actual lesson practice. When we gave the students the aligned gastrulae embedded in an agar block and precise instructions on how to make the bisected gastrula with a model block, all students were able to bisect their gastrulae. It is possible to observe the bisected embryo at various stages in less time by using the photos of bisected embryos, even if students could not successfully bisect the embryo. Replies to a questionnaire survey after the lesson practice suggest that the observation of real embryos is necessary in order to make the class “Frog development” easy to understand and interesting for students.

キーワード：初期胚発生 (*Early embryonic development*)、原腸形成 (*Gastrulation*)、教材 (*Teaching materials*)、アフリカツメガエル (*Xenopus laevis*)

1. はじめに

高等学校学習指導要領解説¹⁾の「発生と遺伝子発現」では、「発生と遺伝子発現についての観察、実験などを通して、遺伝子の発現調節、発生と遺伝子発現について理解させ、それらの観察、実験などの技能を身に付けさせるとともに、思考力、判断力、表現力等を育成することが主なねらいである」と明記されている。カエルの発生において、原腸形成は発生初期に起こる最初のダイナミックな形態形成運動であり、体の構造の基本となる外胚葉、中胚葉、内胚葉が形成される重要な過程であるため、実物のカエルの胚の内部構造を観察することは重要であると考えられる²⁾。しかし、両生類の胚発生は、科学的な探究活動としては時間がかかりすぎることで、卵が小さすぎて生徒の実験技能では不可能なことなどにより、高校生物において観察、実験を行うことが難しい教材の1つとされている³⁾。

本研究では、アフリカツメガエルの原腸胚を用いて、時間を短縮し、かつ確実に胚の内部で起こる動的な変化を観察できる教材を開発すること

を目的とした。

2. 材料および方法

2-1. 実験材料

本研究で用いたアフリカツメガエル (*Xenopus laevis*) はワタナベ増殖から入手し、雄と雌を分けて 20℃で飼育し、給餌と水替えを 2 日に 1 回行った。

2-2. アフリカツメガエルの原腸胚の固定と包埋

アフリカツメガエルの雌は氷麻酔した後、室温の下、ゴナトロピン(あすか製薬株式会社)400 ユニットを皮下注射し、約 10 時間後に雌の背中をさすって産卵を促し未受精卵を採取した。雄は氷麻酔後、脊髄破壊法により安楽死させ、腹部を解剖して精巣を摘出し、Sive ら⁴⁾の方法を参考にして、MMR 溶液 (0.1 M 塩化ナトリウム、2 mM 塩化カリウム、1 mM 硫酸マグネシウム、2 mM 塩化カルシウム、5 mM HEPES (pH 7.8)) 内で精巣を細切して、シャーレ内の未受精卵に媒精した。媒精して 5 分後、0.1×MMR 溶液を加え、その 10

分後、0.1×MMR 溶液で洗い、室温に静置した。正常に受精したことを確認した後、ゼリー層を除去するため、受精から 1 時間後、室温の下、5～20 分間システイン (0.1×MMR 溶液 50 mL、L-システイン 1 g、2.5 N NaOH 200～600 μL) 処理を行った。ゼリー層が除去されたことを確認した後、0.1×MMR 溶液で 5 回洗い、室温で発生させた。

原腸胚を受精後約 13～23 時間内の 1 時間ごとに 0.1×MMR 溶液で希釈した 5%ホルマリン溶液で 23℃で固定した。固定胚は、スクリュウ管瓶 (アズワン株式会社) に入れ、冷蔵庫内 (4℃) で保存した。

寒天 4 g を水 100 ml が入った三角フラスコに加え沸騰する直前まで加熱して溶かした 4%寒天溶液を 6 cm のプラスチック製シャーレ (直径 5.3 cm、深さ 1.4 cm) の中に流し込み、厚さ 2 mm の薄い層を作製した。薄い層が固まった後、再度、溶解した 4%寒天溶液を流し込み、寒天が固まる前に 10 個の固定胚を埋めて卵黄栓が底を向くように柄つき針で揃えた。包埋後、寒天を剃刀でシャーレから切り出し、剃刀で胚が 1 つ入ったブロックに切り取った。

2-3. 切断した原腸胚の教材としての検討

平成 30 年 6 月 15 日に愛媛大学大学院教育学部研究科・教育学部の学生 (16 名、以下、学生と略記) を対象に、アフリカツメガエルの原腸胚の切断胚の観察を行った。少なくとも高校生物の履修者は 6 名 (男 6 名)、未履修者は 3 名 (男 1 名、女 2 名) であった。原腸胚の切断等の細かい操作が可能であるか、実物の胚の断面を観察しスケッチをさせることにより発生経過時間ごとの原腸の変化を考察することが可能であるかを調べた。

授業は導入 15 分、実験 (観察) 70 分、まとめ 5 分の計 90 分で実施した。

導入では、以下のように進化した。

(1) カエルの初期発生について説明した。
(2) 発生が進むにつれて卵黄栓が変化していく動画を見せた。

(3) ワークシート (図 1) の「断面の予想図」の欄に原腸胚の断面の予想図を描かせた。

実験 (観察) では、以下のように進化した。

(1) 発生順に、原腸の長さが異なる 3 段階の胚 (第 1 段階、図 2A ; 第 2 段階、図 2B ; 第 3 段階、図 2C) を配布した。

(2) ワークシートと模型 (図 3) を使用し、観察方法を説明した。

(3) 3 段階の胚のうち、学生には原腸陥入を観察しやすい胚の卵黄栓の大きさである第 2 段階の胚が包埋されている寒天ブロック (縦 約 1 cm、横 約 1 cm、高さ 約 2 mm) を切断させた。第 1 段階、第 3 段階の胚は予め著者らが切断した胚を配布しておき、3 段階の切断胚を実体顕微鏡 (ケニス株式会社、SS-LED) で観察させた。

(4) 各段階の胚の断面を観察した後、ワークシートにスケッチさせ、スケッチに基づいて原腸形成はどのように進むのかを考察し記述させた。

まとめでは、著者らが予め撮影しておいた各段階の胚の断面の写真を TV モニターで示し、原腸胚期では、発生が進むにつれて卵黄栓が小さくなると原腸が伸長することを説明した。

授業後、学生が切断した胚の断面およびワークシートのスケッチと記述から、実物の原腸胚を用いて切断等の細かい操作が可能であるか、原腸形成について正しく考察することが可能であるかを検討するため、学生の切断の精度、予想図と観察した断面のスケッチの正確性、考察の記述を分析した。スケッチの正確性は、胞胚腔や原腸などの内部構造が描けており、第 1 段階から第 3 段階にかけての原腸の伸長が分かるようなスケッチであるかどうかを評価した。

「動物の生殖と発生」 ワークシート

○目的

アフリカツメガエルの胚の断面はどうなっているのか観察し、発生が進むにつれて原腸がどのように伸びていくのか観察しよう。

○使用するもの (2人1つ使用)

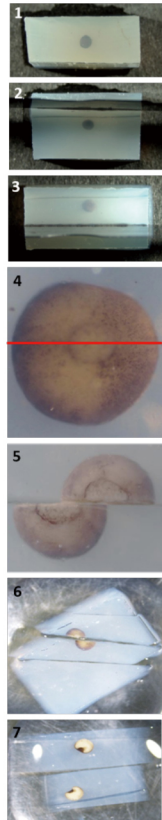
胚が入った寒天 (2種類)、剃刀、剃刀台、スポット、柄付き針、透明のシート、ティッシュ、シャーレ2個

○観察方法

- ①寒天をシャーレに入っている向きのまま透明のシートの上に置き、観察する面にスポットで水を数滴垂らしてから、卵黄栓の位置を確認する (図1)。
- ②卵黄栓が見える面の寒天を、胚に近い位置で剃刀で切断する (図2)。
- ③反対側は少し厚めに寒天を残すように剃刀で切断する (図3)。
- ④観察する面にスポットで水を数滴垂らして、卵黄栓の向きは長径が横になるように置く (図4)。
- ⑤卵黄栓の長径に沿って剃刀で切断する (図5)。
- ⑥余分な寒天を剃刀で切断し (図6)、断面が見えるように倒し (図7)、観察する。

○注意点

- ・剃刀の刃が危ないので、剃刀から手を放す時は必ず剃刀台に差し込むこと。
- ・トリミング後など胚が見えづらい時は少量の水で切断面を湿らせてあげると良い。
- ・④で手元を肉眼で見て、胚の中央を通る位置に剃刀を軽く当てたまま顕微鏡をのぞき込み、卵黄栓の長径を通る位置に調節し直すこと。



○観察結果

	断面の予想図	観察した断面
1		
2		
3		

○考察

- (1) 原腸形成はどのように進むだろうか。観察結果を記述してみよう。

月 日 氏名:

図1 大学生の予備実践のワークシート

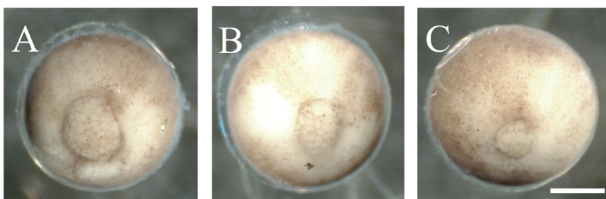


図2 原腸胚の3段階

A: 卵黄栓の直径が 600 μm 以上の胚 (第1段階)

B: 卵黄栓の直径が 550–350 μm の胚 (第2段階)

C: 卵黄栓の直径が 300 μm 以下の胚 (第3段階)

スケールバー: 500 μm



図3 カエル原腸胚の模型

大学生の予備実践において観察方法の説明時に使用した

2-4. 大学における授業実践

(1) 対象および実施日

平成30年12月6日に愛媛大学大学院教育学研究科・教育学部の学生9名（男7名、女2名）を対象に初期胚を観察する授業実践を行った。1年生7名のうち高等学校で生物基礎を履修していた学生は6名（男5名、女1名）、生物を履修していた学生は2名（男2名）であった。

(2) 授業実践

授業は導入15分、実験（観察）70分、まとめ5分の計90分の時間配分で実施した。

導入では、以下のように進行した。

- (1) カエルの初期発生過程において、ダイナミックに細胞が動き、胚葉の分化が始まる原腸胚期について詳しく説明した。
- (2) 卵黄栓や内部構造（胞胚腔や原腸など）がどのように見えるかを理解させるため、実物のアフリカツメガエルの胚の表面や断面をスライドに示し（図4）、実物の胚を観察する目的へとつなげた。

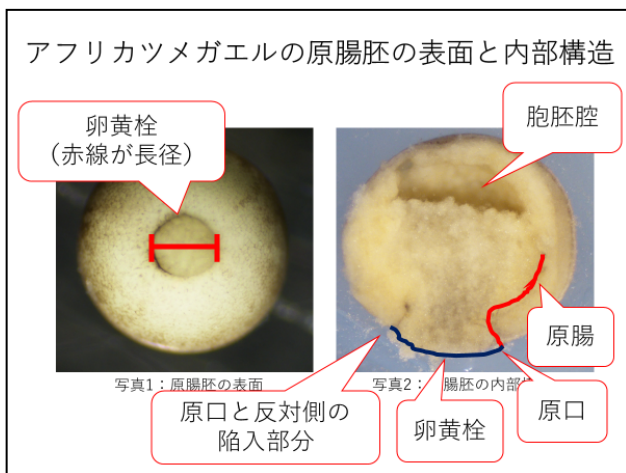


図4 実物の原腸胚の表面や内部構造を示したスライド

大学生の授業実践において導入時に使用した

実験（観察）では、以下のように進行した。

- (1) ワークシート（図5）を配布し、ワークシートと模型（図6A-D）を使用して観察方法を説明した。

(2) 学生が寒天ブロックをトリミングする手順が少なくなるよう、卵黄栓が見える面を真上から見た際、卵黄栓の長径が水平になるように、かつ胚が下に寄っているようにトリミングした寒天ブロック（図7）を、1人に10個、シャーレに入れて配布した。

(3) 実体顕微鏡を用いて、胚の切断と観察を30分間行わせた。胚の切断後は、卵黄栓の大きさと原腸の長さの関係を考えさせるため、自分が切断した胚の断面をよく観察し卵黄栓の大きさと原腸の長さを比較するように促した。

(4) 全員にタブレットを配布した。

タブレット内に、著者らが予め撮影しておいた3段階の卵黄栓が見られる胚の表面と断面の写真（図8）を表示し、卵黄栓の大きさと原腸の長さの関係を調べるため、タコ糸と定規を使用して卵黄栓の大きさと原腸の長さを測定させた。この時、写真上のスケールバーを用いて、タコ糸の長さを実際の長さに換算させた。時間を短縮するため、1人に1つの発生段階のみを計測させた。自分の測定値をワークシートに記入後、それぞれの結果を班で共有させて3段階すべての発生段階の計測値をワークシートに記入させた。

(5) 発生が進むと卵黄栓が変化していく動画と、タブレットと同じ3段階の胚の表面と断面の写真（図8）をスライドに示し、胚表面の卵黄栓の動的な変化と観察した原腸などの内部構造の変化の関係を考察させた。

まとめでは、以下のように進行した。

- (1) 測定値を全体で共有した。
- (2) ワークシートの「まとめ」において卵黄栓の大きさと原腸の長さの関係、および原腸が胚のどの領域に形成されているのかを考察させ、発表させた。
- (3) 質問紙による調査を行った（図9）。

「動物の生殖と発生」 ワークシート

○目的

アフリカツメガエルの原腸胚の縦断面を観察し、原腸形成について考察しよう。

○使用するもの

- 【1人1つ】
実体顕微鏡、剃刀、剃刀台、柄付き針、透明のシート、
胚が入った寒天、シャーレ1個、タブレット、タコ糸、
- 【2人1つ】
スポイト、水の入ったビーカー

○観察方法

- ①寒天をシャーレに入っている向きのまま透明のシートの上に置き、観察する面にスポイトで水を数滴垂らしてから、顕微鏡を覗き込み卵黄栓の位置と大きさを確認する（図1）。
- ②①の寒天を向こう側に倒し、胚より上の寒天を、胚に近い位置で剃刀で切断する（図2）。
胚より下の寒天は少し厚めに寒天を残すように剃刀で切断する（図3）。
- ③寒天を①の向きになるように戻し（図4）、観察する面にスポイトで水を数滴垂らして、卵黄栓の向きは長径が真横になるように置く（図5）。
- ④卵黄栓の長径に沿って剃刀で胚を切断する（図6）。
- ⑤余分な寒天を剃刀で切断し（図7）、上の寒天は向こう側に、下の寒天は手前に、断面が見えるように倒し（図8）、観察する。
- ⑥タブレット上で卵黄栓と胚の断面の写真を表示し、タコ糸を使用し長さを測定する。この時、スケールバーを用いて実際の長さに換算する。

○注意点

- ・剃刀の刃が危ないので、剃刀から手を放す時は必ず剃刀台に差し込むこと。
- ・剃刀に付いた寒天は素手で取らず、必ず柄つき針を使って剥がすこと。
- ・トリミング後など胚が見えづらい時は少量の水で切断面を濡らせてあげると良い。
- ・④で手元を肉眼で見て、胚の中央を通る位置に剃刀を軽く当てたまま顕微鏡をのぞき込み、卵黄栓の長径を通る位置に調節し直すこと。



○観察結果

(スケールバーは500μm)

発生の順番	卵黄栓の大きさ (μm)	原腸の長さ (μm)

○まとめ

- (1) 空欄を埋めよう。
発生が進むにつれ、卵黄栓の大きさが () になると、原腸の長さが () になる。
つまり、卵黄栓の大きさと原腸の長さは (比例 ・ 反比例) する。
また、アフリカツメガエルの原腸陥入は
(植物極側だけで ・ 植物極側から動物極側へ ・
動物極側から植物極側へ ・ 動物極側だけで) 起こる。
- (2) 他に分かったこと、興味を持ったことを記入しよう。

月 日 氏名：

図5 大学における授業実践のワークシート

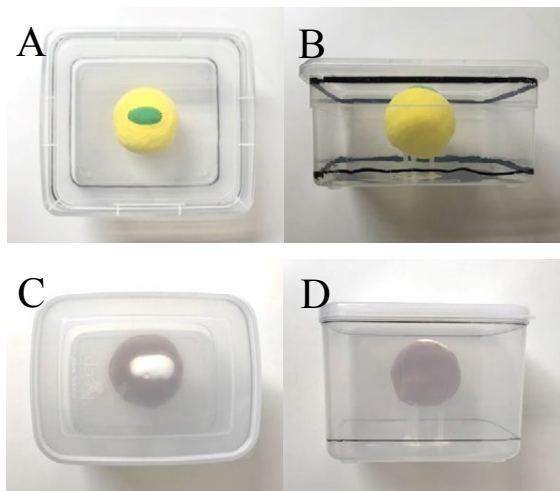


図6 実践で使用したカエルの胚の模型

- A：説明で使用した模型（上から撮影）
- B：説明で使用した模型（横から撮影）
- C：各テーブルに配置した模型（上から撮影）
- D：各テーブルに配置した模型（横から撮影）

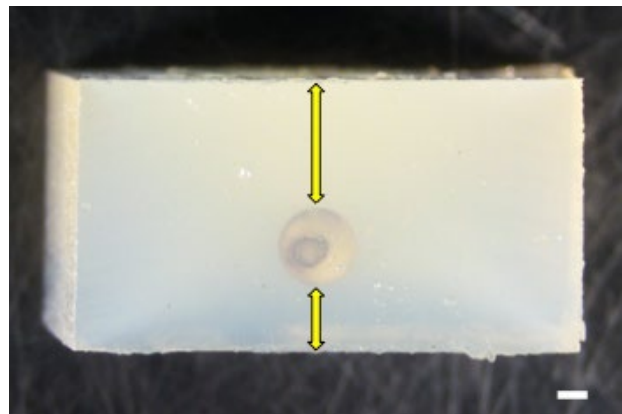


図7 胚が包埋された寒天ブロック

胚が下に寄るように（上の矢印よりも下の矢印が短くなるように）包埋
スケールバー：500 μm

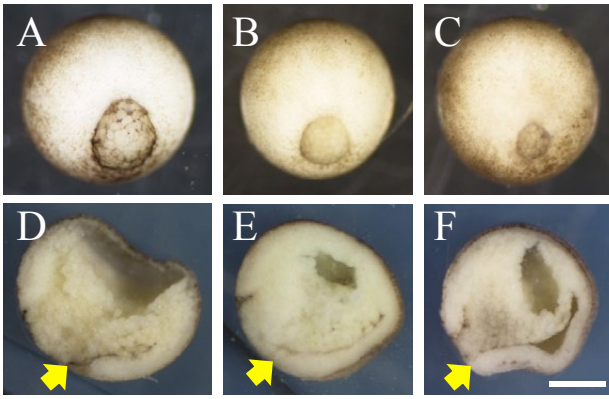


図8 3段階の胚の表面と断面

- A：第1段階の卵黄栓が見られる胚の表面
 - B：第2段階の卵黄栓が見られる胚の表面
 - C：第3段階の卵黄栓が見られる胚の表面
 - D：第1段階胚の断面、黄色の矢印：原口の位置
 - E：第2段階胚の断面、黄色の矢印：原口の位置
 - F：第3段階胚の断面、黄色の矢印：原口の位置
- スケールバー：500 μm

アフリカツメガエルの胚発生を用いた 授業実践に関する質問紙

この度は、私の卒業研究であるアフリカツメガエルの胚発生を用いた授業実践にご協力いただき、誠にありがとうございました。この研究授業に対する質問紙調査にご協力よろしくお願い致します。この調査は卒業研究にのみ使用され、統計的な分析を行い、個人情報と結びつかない形で公開されます。

1~4の当てはまる箇所を○をつけてください。また、Q3・4ではどちらの実験を行ったか、当てはまる方へ○をつけてください。【必須】の質問には、コメント欄に必ず何か書いていただきますようお願い致します。

性別：男性・女性 高校生物の履修の有無：有・無

Q1：ワークシートの観察方法や模型を見て、胚を切断する操作が理解できた。
できなかった 1 2 3 4 できた

改善した方がいいところなどありましたら、記述をお願いします。

Q2：設定された目標「アフリカツメガエルの原腸胚の縦断面を観察し、原腸形成について考察する。」を達成することができた。
できなかった 1 2 3 4 できた

改善した方がいいところなどありましたら、記述をお願いします。

図9 大学における授業実践の質問紙

(3) 教育効果の評価方法

観察・実験の教育効果を検討するため、学生が切断した胚の観察、ワークシートの分析、質問紙調査を行った。授業後に学生が切断した胚を観察し、学生の切断の精度を評価した。ワークシートでは、「まとめ」の穴埋めと選択の回答を3段階で評価した(図5)。

質問紙調査(図9)では、質問1では観察実験の方法について、質問2では授業の目標の達成度について、質問3では授業内容の分かりやすさについて、質問4では授業内容に対する興味・関心度についての各項目を4段階で、質問5では授業の良い点・問題点について自由記述で回答させた。

3. 結果

3-1. 原腸胚の切断胚の教材としての検討結果

予備実践後、学生が切断等の細かい操作が可能であるかを検討するため、切断胚を回収し、実体

Q3：(写真のみの観察・顕微鏡観察からの写真観察)は分かりやすい授業だった。【必須】

そう思わない 1 2 3 4 そう思う

具体的にどういところか、記述をお願いします。

Q4：(写真のみの観察・顕微鏡観察からの写真観察)は興味関心の持てる授業だった。【必須】

そう思わない 1 2 3 4 そう思う

具体的にどういところか、記述をお願いします。

Q5：今回の授業実践で、良い点・問題点を挙げてください。【必須】

良い点	問題点
-----	-----

ご協力ありがとうございました。

顕微鏡で観察して学生の切断の精度を評価した（表 1）。切断面から胞胚腔や原腸の陥入がはっきり観察できた胚（「可能」と評価）は 4 個（25.00%）であった。また、原腸の陥入は観察できたが原口がはっきりと観察できない胚（「少し可能」と評価）は 5 個（31.25%）、原腸の陥入が観察できなかった胚（「不可能」と評価）は 6 個（43.75%）であった。

表 1 学生の切断胚の精度（n=15）

	可能（人）	少し可能（人）	不可能（人）
1 班	2		1
2 班		1	3
3 班	1	3	
4 班	1	1	2
割合	25.00%	31.25%	43.75%

学生に「固定胚の切断操作自体は行いやすいかどうか」を尋ねたところ、多くの学生が「切りやすい」と回答した（11 名、68.75%）。「切りにくい」と回答した学生（5 名、31.25%）の中には、「ワークシートに写真付きで説明はあるが、初めての作業になるので、きれいな切断面を観察するためには練習が必要だ」「寒天を倒したり戻したりと作業が多く、向きが分からなくなる」という記述があった。

次に、原腸形成について考察することが可能であるかを検討するため、ワークシートのスケッチを見て、予想図と観察した断面のスケッチの正確性を評価した。予想図を正確に描けた学生はおらず、断面のスケッチを正確に描けた学生は 2 名（12.50%）であった（図 10）。

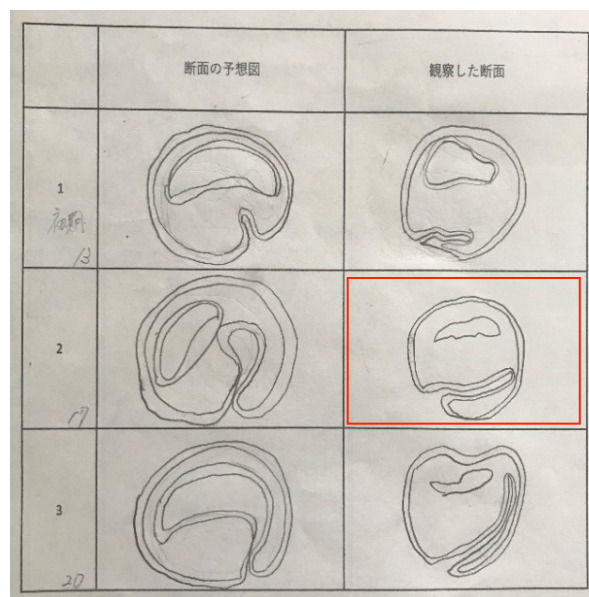


図 10 学生のスケッチ

赤の四角：学生が観察した断面のスケッチ

3-2. 大学における授業実践

(1) 授業中の学生の様子

導入では、予備実践で挙げられた、学生は実物の胚の原腸や胞胚腔などを認識できていないのではないかという問題点を改善するため、原腸胚期について詳しく説明し、実物のアフリカツメガエルの胚の表面や断面をスライド上に示し、卵黄栓や内部構造がどのように見えるかを説明した。学生は観察の時に自ら原腸や原口、胞胚腔の位置を確認する発言があり、内部構造を理解している様子であった。

展開では、予備実践で挙げられた「寒天ブロックを動かす方向が複雑で分かりにくい」という問題を解決するため、新しいワークシート（図 5）の実験操作の説明文の中で、寒天ブロックを動かす順序と方向を一つ一つ細かく指示した。行った実験手順を図 11 に示す。

まず、寒天ブロックを真上から見た際に、胚が下の辺に近い位置にあり、卵黄栓の長径が水平の向きになっている寒天ブロックを作製し配布した（図 7）。胚の向きを揃えた寒天ブロックを配布することにより、最初に寒天ブロックを奥へ倒した際、胚が寒天表面近くに来るので、学生は胚がどこにあるのか分かる。寒天ブロックを配布さ

れた向きのまま実体顕微鏡下に移動させ（図 11A）、その寒天を奥へ倒し、胚の上の寒天を胚に近い位置で切断し（図 11B）、胚の下の寒天は厚めに残して切断させた（図 11C）。寒天を手前に戻すと図 11A よりも胚が鮮明に見えるようになった寒天ブロック（図 11D）に水を1滴垂らし、卵黄栓の長径を通るように切断させた（図 11E）。余分な寒天を取り除き（図 11F）、卵黄栓切断後の上の寒天は奥へ、下の寒天は手前に倒し（図 11G）、切断面を観察させた。この時 ワークシートと同じ手順を口頭で説明しながら、寒天を模した透明のケース内に胚を模した粘土を入れた模型（図 6）を使用して、指示した方向に模型を倒したり、模型に書いた印を使って切断すべき場所を指示したりした（図 11）。ワークシートと模型を使用して細かく指示した結果、実践では寒天を切断する際、寒天の向きについて混乱は見られなかった。

本実践の実験（観察）では、観察の時間として4個ほどの胚を切断できる時間を設けていたが、模型を使用して細かく指示した結果、9名全員が1個目で観察可能な切断胚を作製できた。そのため、学生には最大3個切断させ、切断前に観察した卵黄栓の大きさと切断後の原腸の長さを複数の胚と比較させた。この観察・実験では、学生同士で切断胚を見合ったり、指導者（本論文著者）に積極的に質問してきたりと、活発な様子が見られた。

観察後のタブレットを用いた活動では、タブレット内の切断胚の写真を用いて計測を行ったことにより、切断胚の出来に左右されることなく確実に計測作業を行うことができた。また、1人1つの発生段階のみを計測させ、班内でそれぞれの結果を合わせたことにより、短時間で複数の発生段階の計測を行うことができた。

まとめでは、発生が進むと卵黄栓の大きさが変化する動画を見せることで、手元にあるタブレッ

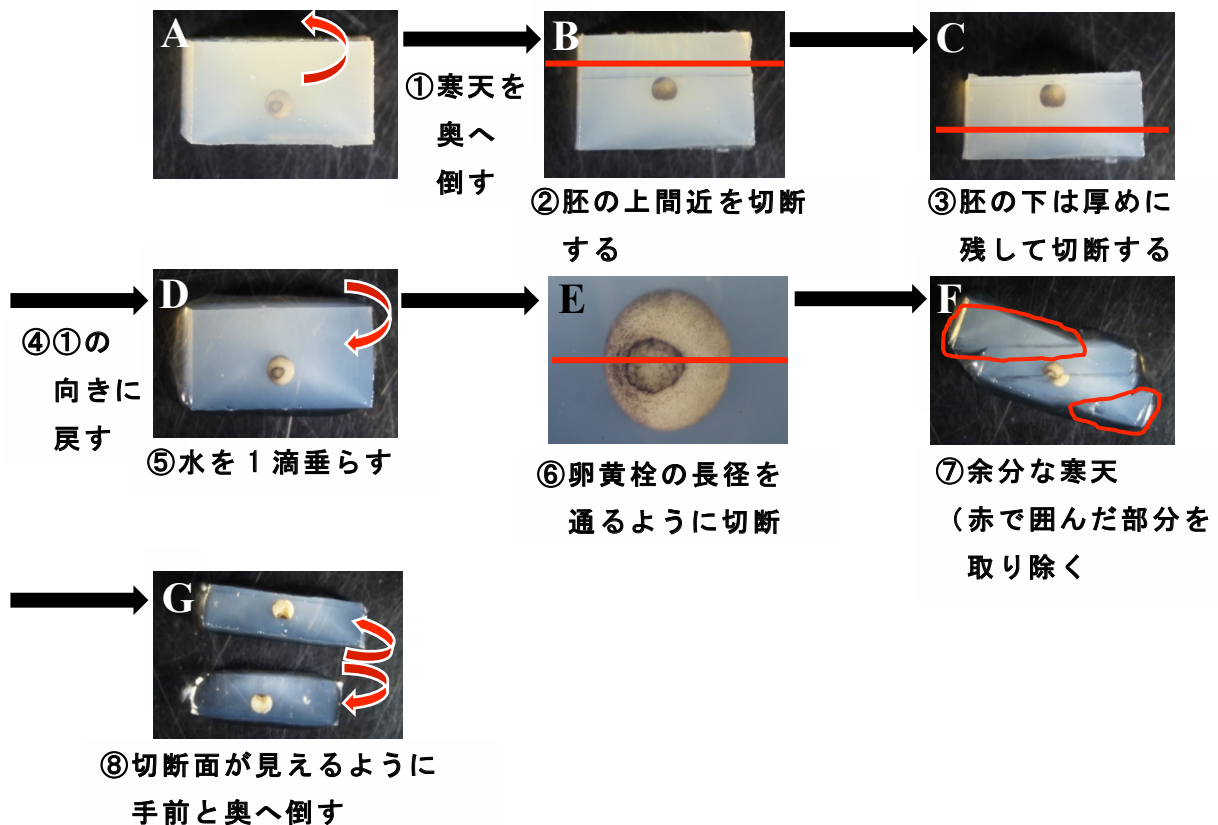


図 11 寒天ブロックの切断の手順
スケールバー：500 μm

ト内の 3 段階の胚の写真の発生の順序を理解させた。動画を見せることによって、実物を実感しやすかったのか、驚きの声も上がった。

(2) 教育効果の評価・分析

ワークシートの「まとめ (1)」の①「発生が進むにつれ、卵黄栓の大きさが (小さく) なる、原腸の長さが (長) くなる。つまり、卵黄栓の大きさと原腸の長さは (反比例) する。」と②「また、アフリカツメガエルの原腸陥入は (植物極側だけで) 起こる。」について評価を行った (表 2)。

表 2 まとめ (1) の回答

評価	内容	(人)
3	①②とも全部正解	2
2	(1) ①全部正解かつ②誤答	6
	(2) ①1つでも誤答かつ②正解	0
1	①1つでも誤答かつ②誤答	1

評価 3 は①②とも全部正解、評価 2 は (1) ①全部正解かつ②誤答、(2) ①1つでも誤答かつ②正解、評価 1 は①1つでも誤答かつ②誤答の場合とした。全部正解の評価 3 が 2 名 (22.00%)、評価 2 (②を誤答) が 6 名 (67.00%) であった。

また、質問紙を評価・分析した (表 3)。質問 1 の「ワークシートの観察方法や模型を見て、胚を切断する操作が理解できた。」については、できたとする評価 4 が 9 名中 8 名であった (表 3)。

表 3 2 つの班の質問紙の評価結果

	Q1	Q2	Q3	Q4
評価 1				
評価 2				
評価 3	1	3	1	
評価 4	8	6	8	9

質問 2 の考察 (「設定された目標「アフリカツメガエルの原腸胚の縦断面を観察し、原腸形成について考察する。」を達成することができた。))

については、達成できたと評価の高い評価 4 か 3 のみだった (表 3)。

質問 3 の授業の分かりやすさ (「(観察) は分かりやすい授業だった。)) については、9 名中 8 名が分かりやすいとする評価 4 だった (表 3)。自由記述には、「顕微鏡で自分で切って実験を行ったため、自分が今何を観察しているのかということや、何を計算しているのかということが分かりやすかったです」「実際の胚を自分で動かしながら観察するので、動物極、植物極、卵黄栓、原腸などの位置関係を空間的に理解することができた」という記述があった。

質問 4 の授業に対する興味・関心度 (「(観察) は興味関心の持てる授業だった。)) については、全員が興味関心の持てるとする評価 4 であった。改善点の自由記述には、「自分で作業してうまく観察できると楽しいし、興味を持って印象に残りやすくなると思います」という記述があった。

質問 5 の授業の良い点と悪い点についての自由記述を分析した。「模型があって向きがよく分かりました」「説明が丁寧で、観察に手まどわずにできて、良かったです」という記述があった。

4. 考察

4-1. 大学生を対象とした予備実践と授業実践

大学生を対象とした予備実践後のアンケートでは、操作方法について学生の半数以上 (68.75%) が「切りやすい」と回答したが、実際には切断胚をうまく作製できなかった学生が多かった。この予備実践の結果を踏まえて観察の指導法を改善したことにより、大学生の実践では、ほとんどが 1 年生の全員が 1 回で観察可能な切断胚を作製できた。よって、観察の指導法を次のように改善すれば、固定胚を切断する操作は簡単であり、高校生でも可能ではないかと予想される。

導入において、実験前に実物の胚の表面と内部構造の写真を使用して胞胚腔や原腸などの内部構造について説明が必要であると考えられる。導入の説明により、授業実践では顕微鏡観察や卵黄

栓と原腸の計測を滞りなく行うことができたと考えられる。

観察では、「寒天ブロックを動かす方向が複雑で、ワークシートの説明だと分かりにくい」という意見があったため、ワークシートの説明文で寒天ブロックを動かす順序と方向を一つ一つ細かく指定し、寒天ブロックの模型を使用して立体的に考えられるよう、動かす方向を指示した。授業後の質問紙には「模型があって向きがよく分かりました」「説明が丁寧で、観察にてまどわずにできて、良かったです」という記述もあったことから、胚の向きを揃えた寒天ブロックを配布し、模型などを用いて切断方法を細かく指示し、卵黄栓の長径に沿って胚を切断すれば、混乱なく簡単に原腸が見える切断胚を作製できると考えられる。

さらに、予備実践における学生の切断の精度とスケッチの正確性の低さから、スケッチを用いて原腸の長さや卵黄栓の大きさの関係や原腸の陥入の様子を考察することは難しいと考えられた。断面の観察後、スケッチを正確に描けたのは2名と少なかつたため、スケッチに代わる、原腸形成について考察できる方法が必要であると考えられた。そこで授業実践では、スケッチ使わない方法として、タブレット内の切断した胚の写真を使って考察させる活動にした。卵黄栓の大きさと原腸の長さを計測して捉えることで、卵黄栓の大きさと原腸の長さの関係を理解しやすくなったと考えられる。

カエル切断胚の観察のための実践方法をまとめると、以下のようになる。

- ①導入：実物の胚の切断面の写真を使用して胞胚腔や原腸などの内部構造について説明する。
- ②観察：初期胚を向きを揃えて包埋した寒天ブロックを準備する。ワークシートの説明文で寒天ブロックの動かす順序と方向を細かく指定し、模型を使用して動かす方向を指示する。切断する胚は1つの発生段階のみにする。

③考察（まとめ）：タブレット内の切断した胚の写真（1人1つ）を使って原腸の長さなどを計測し、班内でそれぞれの結果を共有する。

これらにより、時間を短縮し、かつ確実に胚の内部で起こる動的な変化を観察できる。本研究では、実物の観察を補うものとしてタブレット（写真）を活用した。教員が様々な発生段階の胚を準備できなくても、1つの段階の胚を学生に切断させ、各発生段階の写真を使えば、実物の胚も観察でき、かつ時間を掛けずに様々な段階の胚の切断面を見ることが可能である。切断した胚の写真を使うことにより、学生が切断胚をうまく作製できなかったとしても、確実に胚の切断面を見ることができる。

また、教員の準備段階で行うべき改善点については以下の2点が挙げられる。

1つ目は、1人当たりの寒天ブロックを増やす必要がある。学生1人につき1つの寒天ブロックを切断させたが、初めてで慣れない操作なので、初めのいくつかはうまく切断できない場合もあると考えられる。しかし、うまく胚を切断できた喜びや自分が切断した胚を観察することは、興味・関心を持たせるために重要であると考えられるため、切断の練習ができる多くのブロックが必要である。

2つ目は「包埋された胚の卵黄栓が斜めを向いているものは、卵黄栓の長径を切断するには難しい」という学生の意見もあったことから、包埋時の卵黄栓の向きを統一する必要がある。卵黄栓が傾いていると長径に沿って真上から切断することができないので、寒天表面近くにあり真上から見て卵黄栓全体が見え、かつ長径が水平になるように胚が埋まった寒天ブロックを作製すると胚が切断しやすくなる。

4-2. 顕微鏡とタブレットを用いた観察

大学の授業実践後の質問紙調査では、質問紙の質問3の授業の分かりやすさにおいて、評価が高い学生が多かった。また、自由記述に、「自分が今何を観察しているのかということや、何を計算

しているのかということが分かりやすかった」

「原腸などの位置関係を空間的に理解することができた」といった記述があったことから、実物を観察することは、生徒にとって授業・実験内容が分かりやすくなることが示唆される。

質問紙の質問4の興味・関心度において、全員が評価4であった。また、「胚を割って中身が見れるという期待感が興味を引いた」など、実験・観察をすることにより興味関心を引き印象に残るといった記述があった。これらの結果から、実物を用いて観察実験を行うことで、実際に自分で切断して普段見られないものを見ることができる授業は生徒の興味・関心をひきやすくと考えられ、「カエルの発生」の授業においては、興味・関心を引くために顕微鏡観察が必要であることが示唆される。

全ての質問において評価3以上であり、自由記述では肯定的な記述が多かった。よって、実物の胚を用いて顕微鏡観察を行った方が、教育効果が高いことが示唆された。「カエルの発生」の授業においては、実物観察と写真を組み合わせることにより、時間を短縮し、かつ確実に胚の内部で起こる動的な変化を観察でき、生徒にとって授業内容が分かりやすく、興味・関心を引きやすくなると考えられる。

しかし、「iPadでたこ糸を使って測るときに、iPadの画面が動いて上手に測ることができなかつたので、iPadではなく印刷した紙を使って測った方がスムーズに行うことができると思った」という記述があったことから、今回のような卵黄栓の大きさや原腸の長さを測定する授業では、タブレットよりも紙媒体を使用した方が良いと考えられる。

今後の課題としては、高等学校の学校現場において使用できる授業内容に改良することが挙げられる。今回の実践では発展的内容が含まれていたため、高校の学習内容に則して原腸胚の内部構造と原腸の伸長を理解させることを目的とした観察・実験にする必要があると考えられる。学校でアフリカツメガエルを飼育し、固定胚を寒天に

包埋してブロック状に加工する準備が必要であるため、その工程を簡単にまとめた、教師もしくは生徒が行いやすいプロトコルが必要であると考えられる。また、本研究で開発した教材や授業実践事例は、教員を対象とした研修会や教育支援活動などで紹介することが有用であると考えられる。

謝辞

アフリカツメガエルの飼育や胚採集に協力いただきました山本幸宗氏に感謝申し上げます。

本研究は、平成29年度愛媛大学教育学部学部長裁量経費の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) 文部科学省 学習指導要領解説理科編理数編 大日本図書 (2018)
 - 2) 古田島貴之 カエルの原腸胚および神経胚の模型作成 平成21年度 高等学校授業力向上研修実践記録 (2009)
 - 3) 苗川博史 両生類胚の初期発生過程および原基図を理解するための粘土教材 生物教育 52 (4) : 193-200 (2012)
 - 4) Sive, H. L., Grainger, R. M., Harland, R. M. *Early Development of Xenopus laevis : A Laboratory Manual*. pp. 91-101, 283-297. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York. (2000)
- 本文中で参照した教科書
- 浅島誠ほか27名 (2018) 改訂生物. 平成29年検定. 東京書籍.
- 本川達雄ほか17名 (2018) 生物改訂版. 平成29年検定. 啓林館.
- 嶋田正和ほか22名 (2018) 改訂版生物. 平成29年検定. 数研出版.
- 庄野邦彦ほか19名 (2018) 生物新訂版. 平成29年検定. 実教出版.
- 吉里勝利ほか20名 (2018) 改訂生物. 平成29年検定. 第一学習社.