

被子植物と送粉昆虫の共進化と花粉発芽の最適条件に関する 教員研修用教材の開発と評価

—— 中学校理科第2分野を対象として ——

堂 囿 いくみ*

理科教員高度支援センター／環境科学分野

(2017年5月29日受理)

DOHZONO, I.: Development and evaluation of teaching materials for training of teacher in-service about the coevolution of plant-insect pollinator and most suitable condition of pollen germination: as an object for biology area in junior high school. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **69**: 335-340. (2017) ISSN 1880-4330

Abstract

I developed the teaching materials for training of teacher in-service about the coevolution of plant-insect pollinator and most suitable condition of pollen germination for the junior high school teachers. This teaching development is composed of lectures and practical training of experiments for the following two themes; 1. Flower diversification are caused by the interaction between flower and insect-pollinator. 2. Pollen germinate under suitable temperature and culture medium. The results actually performed in-service training of junior high school teachers using this teaching development indicates that most of the teachers attended workshop were able to acquire the knowledge of the coevolution of plant-insect pollinator and most suitable condition of pollen germination.

Keywords: culture medium for pollen germination, floral diversity, nectar, insects mouth parts

Advanced Support Center for Science Teachers, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 本論文では、被子植物と昆虫の共進化と花粉発芽の最適条件に関する知識と実験手法を中学校教員に修得させることを目的として教材を開発した。本研究で開発した教材は、1. 被子植物の花の多様化が、花粉を運搬する昆虫との関係で進化してきたことを理解するため、2. 花粉発芽の最適条件について理解するための講義・実習から構成されている。この教材を用いた教員研修を行った結果、ほとんどの教員が被子植物の花の多様化が送粉昆虫との関係によって進化してきたことを理解し、花粉発芽の最適条件があることを理解した。

* 東京学芸大学 理科教員高度支援センター／環境科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

1. はじめに

被子植物は植物の中でも最も種数が多く、特に花の形・色・匂いなど多様化が著しい。この多様化は、受粉様式の相違が要因と考えられている (Proctor et al. 1996)。特に昆虫に花粉を運搬してもらう虫媒花では、著しい花の多様化が見られる。一方、風によって送粉されている風媒花は、花に色や匂いのない場合が多い。

中学校理科第2分野の「花のつくりと働き」と「植物の分類」は、中学校1年生で学習するが、被子植物の花の多様性については触れていない。植物の有性生殖と受精については、中学校3年生の「生命の連続性」において学ぶ。植物の受精は直接確認することは難しいので、中学校理科の教科書 (例えば東京書籍, 大日本図書, 学校図書, 教育出版, 啓林館) には花粉の発芽や花粉管伸長の実験が掲載されている。この実験を通して、生徒は被子植物の花粉が柱頭に受粉してから受精までの過程を理解する。

送粉昆虫による受精までの過程が被子植物の花の多様化をもたらしていることは、現在の中学校学習指導要領 (文部科学省 2008b) では扱われていない。近年、地球環境の保全が注目される中、生物多様性や生物間相互作用を理解することが重要となっている (宮下ほか 2013)。被子植物と送粉昆虫の関係は、身近な材料であり、生物多様性や生物間相互作用を理解しやすいと考えられる (酒井 2015)。

花粉の発芽・花粉管伸長実験は、植物の受精を理解する上で重要な実験である。花粉発芽・花粉管伸長は、培地と温度に最適な条件があり、植物の種類によってその最適条件が異なる。この実験は教科書にも掲載されているため授業で取り扱われることが多い (有馬ほか 2016, 細矢ほか 2016, 岡村ほか 2016b, 霜田ほか 2016, 塚田ほか 2016)。しかし、生徒が花粉発芽や花粉管伸長の状況を観察できない場合もある。これは、教科書には花粉発芽の最適条件について掲載されていないため、教員が適切な処理を取れないこと、また教員に実験経験がないことが原因と考えられる。池田 (1997) は花粉発芽実験の生徒用教材を開発して、6種類の植物を用い、糖の種類と濃度条件を変えた時に、各植物種がどの条件で最もよく発芽するか検討した。しかし、花粉発芽の最適条件を理解させることには触れていない。

本論文では、花の入口から蜜源までの長さとお口の長さや口器の長さを測定して、測定値の比較から昆虫の蜜を吸い出せる可能性を推定させることと、花粉発芽時の複数の条件を比較してその最適条件があることを理解させる

ことを目的に教員研修用の教材を開発した。

2. 被子植物と送粉動物の関係について 教科書の取り扱い

小学校学習指導要領 (文部科学省 2008a) では、小学校5年生で受粉に昆虫や風が関係し、植物の花粉が雌しべにつくと種子ができることを学習する。さらに中学校学習指導要領 (文部科学省 2008b) では、中学校第2分野の植物の体のつくりと働きの中で、花のつくりと働きを学習する。中学校学習指導要領解説理科編 (文部科学省 2008c) では、被子植物を主にとりあげ、受粉後に胚珠が種子になることを中心に扱うよう記述されている。被子植物と送粉昆虫の関係について、例えば岡村ほか (2016a) では、中学校1年生・単元1「植物の世界」の中で発展的な扱いとして取りあげている。その内容は、①花の匂いや色が昆虫や鳥などの動物を引きつける働きをしていること、②花卉の様子が蜜の存在を動物に教えていること、③動物が蜜を吸ったり花粉を食べるときに受粉が起こることで説明されている。そして、風によって花粉が運ばれる例として、イネの花には色鮮やかな花卉がないことを取りあげている (岡村ほか 2016a)。したがって、植物の受粉に昆虫や風が関係しており、花粉が雌しべに運ばれると種子ができることを学習する。しかし、それにより引き起こされた被子植物の花の多様化については、学習の機会がほとんどない。

3. 花粉発芽・花粉管伸長実験の教科書の取り扱い

植物の生殖過程を理解させるために、教科書には花粉管伸長の実験が取りあげられている。この実験では、①ハウセンカが多くの教科書で取りあげられている (例えば、有馬ほか 2016, 細矢ほか 2016, 岡村ほか 2016b, 霜田ほか 2016, 塚田ほか 2016)。これに加え、カボチャ (塚田ほか 2016) とインパチェンス (有馬ほか 2016, 霜田ほか 2016) も取りあげられている。②培地として、寒天培地 (細矢ほか 2016, 岡村ほか 2016) と水溶液培地 (有馬ほか 2016, 霜田ほか 2016, 塚田ほか 2016) があげられている。水溶液培地は寒天培地より作成時間を短縮できるので、この培地を使用することで観察時間をより確保できる利点がある。③培地条件として、砂糖水5~10% (岡村ほか 2016b), 砂糖水約10% (細矢ほか 2016), 砂糖水10% (塚田ほか 2016), しよ糖水溶液8% (有馬ほか 2016), しよ糖水溶液10% (霜田ほか 2016) が掲

載されている。ハウセンカやインパチェンスは、最適な培地・温度条件の幅が広く、培地播種後1～5分で発芽が見られ、授業内の実験に適した材料である。しかし、この場合も実験時の室温が20度以下になると発芽率が低くなることもあり、教員が最適条件を理解していることは実験指導する上で重要である。また、ハウセンカは栽培が必要なこと、インパチェンスは購入する必要があるため、準備に手間がかかる。

4. 教員研修用教材の開発

4. 1 花の形態と昆虫の口器形態の対応

被子植物の花の形と送粉者のグループ（分類群）の対応関係を、送粉シンドロームという。送粉シンドロームは類似の送粉者に送粉される時、花に対して送粉者からの同程度の選択圧が働くため、類似の花形態が進化するという考えを背景に、多様化や平行進化が説明されている（Faegri and Pijl 1979, Proctor et al. 1996）。この時の選択圧とは、送粉者によって最も効率よく送粉され、多くの種子ができるような花の形が次世代に残っていくことをいう（Stebbins 1970, Waser et al. 1996）。

4. 1. 1 花の分類

花の形と花粉を運搬する送粉昆虫の関係を理解するために、ワークシート（図1）を使って観察・作業をする。はじめに花の形を大きく2つのタイプに分

けて認識する。タイプAは、花弁が立体的または筒状になり、蜜源までの距離が長いもの、タイプBは花の形が皿状で蜜源までの距離が短いものとする。東京学芸大学構内でギボウシ、カワラナデシコ、ヒルガオ、ヤブガラシ、アジサイ、ユウゲショウを採取し、研修者自身がタイプ分けをする。

4. 1. 2 蜜量と蜜の糖度の測定

- (1) マイクロキャピラリーを用いて、花から蜜を回収する。マイクロキャピラリーは細いガラス管で、毛細管現象で一定量（今回使用したのは2または5μL）を採取する。マイクロキャピラリーは長さ32mmなので、マイクロキャピラリー内の液面までの長さをノギスで測り、採取した蜜量を算出する。
- (2) マイクロキャピラリーに採取した蜜は、糖度計を用いて糖度を測定する。
- (3) 各タイプの花の縦断面をワークシートにスケッチし、花の入口から蜜源までの距離、葯から蜜源までの距離、柱頭から蜜源までの距離をノギスで測定し、タイプAとBの形の違いを比べる。
- (4) マイクロキャピラリーで蜜を回収するときに、雄しべの葯に接触したことを確認するため、実体顕微鏡でマイクロキャピラリーに花粉が付着していることを観察する。この観察で、マイクロキャピラリーの花粉の付着位置は、葯から蜜源までの距離に対応していることを確認する。

花の形態と送粉昆虫の口器形態ワークシート

<目的>
花形態とその花を訪れ花粉を運搬する送粉昆虫との間、形態的対応があることを理解する。

<観察1>
①学芸大学構内から、立体的なタイプと皿状のタイプの花を2種ずつ採取する。
②別途準備している蜜をキャピラリー（長さ32mm、測定量2または5μL）で回収して量を測定し、その後、糖度計で糖度を測定する。
③花の縦断面をスケッチし、花の入口から蜜源までの距離、葯から蜜源までの距離をノギスで測定する。

タイプA：花弁が筒状または立体的で蜜源までの距離が長い花

蜜量と糖度
 μL %
 花の入口から蜜源までの距離
 mm
 葯から蜜源までの距離
 mm
 柱頭から蜜源までの距離
 mm

タイプB：蜜源までの距離が短い花

蜜量と糖度
 μL %
 花の入口から蜜源までの距離
 mm
 葯から蜜源までの距離
 mm
 柱頭から蜜源までの距離
 mm

質問：キャピラリーに花粉が付着したが、実体顕微鏡で確認しない
 タイプA _____
 タイプB _____

<観察2>
短いキャピラリー（長さ15mm）を用いて、タイプAとBの花から蜜を回収する

質問：短・長のキャピラリーは、タイプAとBどちらの花の蜜を回収しやすいか
 短いキャピラリー： _____
 長いキャピラリー： _____

<観察3>
① 昆虫標本を用いて、ハチ・チョウ・ガ・アブ・甲虫の口器を観察し、気づいたことを書く
② 各分類群の口器の長さをノギスで測定する

ハチ（膜翅目）	チョウ・ガ（鱗翅目）
観察して気づいたこと	観察して気づいたこと
口器の長さ <input type="text"/> mm	口器の長さ <input type="text"/> mm
甲虫（甲虫目）	アブ（双翅目）
観察して気づいたこと	観察して気づいたこと
口器の長さ <input type="text"/> mm	口器の長さ <input type="text"/> mm

質問1：昆虫の各分類群は、タイプAとBのどちらの花の蜜を採取するのに適しているか。またその理由も考えなさい
 ハチ（膜翅目）： _____ 理由： _____ チョウ・ガ（鱗翅目）： _____ 理由： _____
 甲虫（甲虫目）： _____ 理由： _____ アブ（双翅目）： _____ 理由： _____

<観察4>
昆虫標本を用いて、選んだ花の蜜を吸って実物にしたとき、花柄は体のどの部位（頭・胸・腹）に付くか考えなさい。

ハチ（膜翅目）： _____	チョウ・ガ（鱗翅目）： _____
甲虫（甲虫目）： _____	アブ（双翅目）： _____

図1 花の形態と送粉昆虫の口器形態に関するワークシート

4. 1. 3 昆虫の口器の長さの測定と形態観察

- (1) 送粉昆虫として、4つの分類群（膜翅目・鱗翅目・甲虫目・双翅目）の標本を用いて、口器を観察しワークシートに気づいたことを書き出す（図1）。
- (2) 口器の長さをノギスで測定する。各分類群の昆虫の口器の長さ、タイプAとBの花の入口から蜜源までの長さを比較し、2つの花タイプの吸いやすさを解釈する。タイプAのような蜜源までの距離が長い花は、ハチ（膜翅目）やチョウ（鱗翅目）など口器（口吻部分）の長い昆虫しか蜜を吸うことができない。一方、タイプBのような、蜜源までの距離が短い花はハチやチョウのような口器の長い昆虫の他、アオハナムグリ（甲虫目）やハエ類（双翅目）など口器が短い昆虫でも蜜を吸う（舐める）ことができることを解釈する。
- (3) 蜜源までの距離が長い花は、口器（口吻）の長い昆虫が蜜を吸う時に花粉が葯から柱頭へ運搬され、口器（口吻）の長い昆虫は、蜜源までの距離が長い花から蜜を優先的に摂取できる。このような対応関係は共進化の結果であることを理解させる。

4. 2 花粉発芽実験

被子植物の柱頭に付着した花粉は発芽して、花粉管が伸びる。花粉管の中には2つの精細胞があり、花粉管が胚珠へ到達すると、ひとつの精細胞が卵細胞と受精し、もうひとつは胚珠内の極核と受精して胚乳になる。これを重複受精という。

4. 2. 1 最適な培地濃度と温度条件

本実験ではシロツメクサの花粉を用いた。シロツメクサはヨーロッパ原産の外来種であるが、別名クローバーとも呼ばれ親しまれている。また、花が4月から10月まで長く開花しており、都市部でも山間部でも雑草として生育しているため手に入れやすい。しよ糖濃度や温度条件によって花粉の発芽率が変化し、最適な条件があることを理解するために、しよ糖の濃度を0, 15, 30%, 温度を室温（25℃）と冷蔵庫内（5℃）の条件にして実験する（図2）。

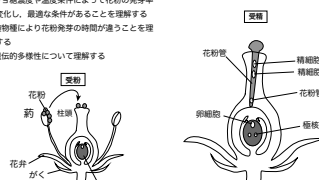
- (1) しよ糖の濃度0, 15, 30%の溶液をそれぞれ98.5mLつくり、1.5gの寒天を加えて加熱し、スライドガラス上に寒天培地を作成する。
- (2) 培地が冷えて固まったら、各濃度2枚ずつシロツメクサの花粉を散布して、1枚は室温で、1枚は冷蔵庫内に入れる。
- (3) 5分または10分毎に花粉の発芽を顕微鏡で観察し、発芽していたら観察範囲を決めて花粉発芽率（発芽していた花粉数/全花粉数）を算出する。
- (4) 時間に対しての花粉発芽率のグラフを、ワークシートに書き込み（図2）、最適なしよ糖濃度と温度の関係を考察する。

シロツメクサの花粉は、しよ糖濃度15%で室温（25℃）の時に最もよく発芽し、10分ほどで発芽が観察できる。最適な条件であっても、早く発芽する花粉と発芽しない花粉が観察される。その理由として、複数の花から花粉を採取した場合は、個々の花の成熟程度が異なる

被子植物の花粉発芽実験

<目的>

- ・しよ糖濃度や温度条件によって花粉の発芽率が変化し、最適な条件があることを理解する
- ・植物種により花粉発芽の時間が違うことを理解する
- ・遺伝的多様性について理解する



<準備するもの>

- ・シロツメクサ（マメ科）、その他季節の花
- ・寒天培地（0%, 15%, 30%しよ糖濃度に1.5%になるように寒天を加え加熱したもの）
- ・スライドガラス
- ・スポイト
- ・冷蔵庫

<方法>

(1) しよ糖濃度・温度と花粉発芽率

- ① 各しよ糖濃度の寒天培地を温めて溶かし、スポイトでスライドガラスの表面全体に流す。
- ② 冷えて固まった寒天培地に、シロツメクサの花粉を散布する。これを各しよ糖濃度で2枚作成する。
- ③ 1枚は室温で、1枚はシャーレにいれてから冷蔵庫内に置く。

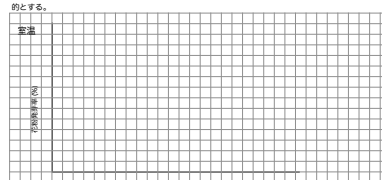
<観察1>

5分または10分毎に顕微鏡で観察し、花粉管が伸びていたら、観察範囲を決め、ステージのメモリを記録する。観察範囲内の全花粉数あたりの花粉管が伸びている花粉数を発芽率とする。

質問：発芽している花粉と発芽していない花粉が観察される理由は何か。

<観察2>

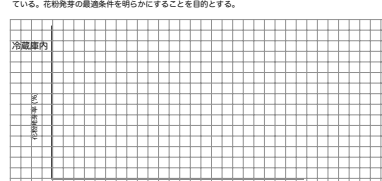
花粉の発芽・花粉管伸長は遺伝によって伸長すると考えられている。培地のしよ糖の役割は、適した浸透圧にすること花粉管伸長のエネルギー源だと考えられている。しよ糖濃度の最適な条件を明らかにすることを目的とする。



質問：最適なしよ糖濃度の条件は何%だったか。

<観察3>

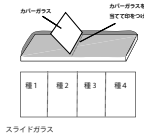
花粉の発芽・花粉管伸長は温度の影響を受けやすく、一般に開花時期の温度が最適温度となっているといわれている。花粉発芽の最適条件を明らかにすることを目的とする。



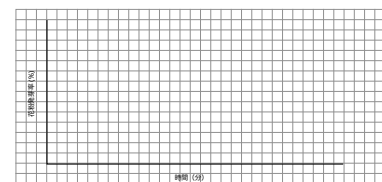
質問：最適な温度条件は何度だったか。

(2) 植物種による花粉発芽率の違い

- ① 15%しよ糖の寒天培地を温めて溶かし、スポイトでスライドガラス表面全体に流す。
- ② 冷えて固まった寒天培地に、採取した植物種ごとの散布場所がわかるように、カバーガラスを押し当てて印をつけて区切る。
- ③ 5分または10分毎に顕微鏡で観察し、花粉管が伸びていたら、観察範囲を決め、ステージのメモリを記録する。各種ごとに、観察範囲内の全花粉数あたりの花粉管が伸びている花粉数を発芽率とする。



<結果>



質問：花粉発芽率は種によって違いは見られたか。違いが見られた場合は、その理由を考えよ。

質問：今回の実験結果から、中学校において花粉発芽実験を行う上で、注意すべき点は何か。

図2 花粉発芽実験ワークシート

可能性が考えられる。さらに、ひとつの花の中でも、花粉ひとつひとつが持っている遺伝子は同一でないことの可能性が考えられる。

4. 2. 2 花粉発芽率の植物種間比較

(1) 植物種による花粉発芽率の相違を理解するために、スライドガラス1枚に15%しよ糖濃度の寒天培地を作成し、4種類の植物の花粉を散布する。室温(約25℃)のみで行う。

(2) 5分または10分毎に花粉の発芽を顕微鏡で観察し、時間に対する花粉発芽率を観察記録する。植物の種類による時間に対する発芽率を比較する。

植物の種類により、最適しよ糖濃度が異なるため、時間に対する発芽率には相違がみられる。今回用いた材料の中では、シロツメクサが10分ほどで最も早く発芽し、ユウゲシヨウやアジサイは30分以上経過しなければ発芽が見られない。最適しよ糖濃度であっても発芽時間は植物種によって異なっており、サザンカでは10分、ツバキでは60分、ユリでは420分(7時間)である(兵庫県立教育研修所 2004)。また、最適しよ糖濃度は、ホウセンカ、サザンカ、ツバキでは10%、アブラナやユリは15%である(鹿児島県総合教育センター 2005、北海道立理科教育センター 2008)。

5. 結果と評価

5. 1 アンケート結果

開発した中学校理科教員研修用の教材を実践した。研修時間は3時間、受講者は10名で、終了後にアンケートで理解度を調べた。アンケート内容は、参加者の教職経験年数と専門分野、研修内容の難易度、研修内容の理解度の質問で構成されている(図3)。

研修参加者の教職経験年数は、10年未満と20年以上に分かれ、その間の受講者はいなかった。出身大学の専攻は、教員養成系と理工系でほぼ半分の割合、専門分野は理科系とその他でほぼ半分の割合であり、理科系ではその他を除くと生物が一番多かった。

研修の時間については、半数がちょうど良いと回答したが、半数は短いと感じていた。これは実験作業の量が多かったため、時間内に全ての作業を終えることができなかったためと考えられる。研修の難易度に対する問では、7名の教員がちょうど良いと回答しているが1名はやや難しいと回答した。

花の形と送粉昆虫の形態的対応について理解できたかどうかの問について(図3, ①~⑤)、①と③の花の形や昆虫の口器の違いは、ほぼ全員が観察を通して

●受講者の情報

教職経験年数		大学での専攻		大学での専門	
0~5年未満	0	教員養成系	4	生物	3
5~10年	6	理工系	4	物理、応用物理	1
11~15年	0	その他	1	理科教育学、理科	1
16~20年	0	未回答	1	その他	4
20年以上	4	計	10	未回答	1
計	10			計	10

●質問: 研修の時間と難易度について

研修の時間は適切だったか		研修の難易度は適切だったか	
短すぎる	1	易すぎる	0
やや短い	4	やや易しい	2
ちょうど良い	5	ちょうど良い	7
やや長い	0	やや難しい	1
長すぎる	0	難すぎる	0
計	10	計	10

●研修内容の理解

①花の形態について立体的な花と皿状の花と区別できた		②花の蜜量と糖度を測定できた	
一人でできた	9	一人でできた	2
相談しながらできた	1	相談しながらできた	6
できなかった	0	できなかった	2
計	10	計	10

③昆虫の各分類群の口器を観察し、違いを理解できた		④昆虫の体のどの部分に付着して花粉の授受が起こるか理解できた	
一人でできた	10	理解していた	3
相談しながらできた	0	説明で理解できた	4
できなかった	0	やや理解できた	0
計	10	理解できなかった	3
		計	10

⑤昆虫の体に付く花粉の位置は、植物種と昆虫種の間で違うことを理解できた		⑥花粉が発芽した状態を見分けることができた	
一人でできた	3	一人でできた	7
相談しながらできた	4	相談しながらできた	3
できなかった	3	できなかった	0
計	10	計	10

⑦シロツメクサの花花粉発芽に最適なシヨ糖濃度があることを理解できた		⑧シロツメクサの花花粉発芽が低い温度では抑制されることを理解できた	
理解していた	3	理解していた	3
説明で理解できた	6	説明で理解できた	6
やや理解できた	1	やや理解できた	1
理解できなかった	0	理解できなかった	0
計	10	計	10

⑨植物種によって、花粉発芽までの時間が違う理由を理解できた

理解していた	2
説明で理解できた	7
やや理解できた	0
理解できなかった	1
計	10

●学校での理科教育の指導(複数選択)

授業に活用	10
教材づくりの基礎技術	7
クラブ指導	0
実験観察への自信	1
役に立たない	0
その他	0
計	18

図3 教員研修の参加者に対するアンケートの結果
詳細は本文参照

理解することができた。しかし、④と⑤の花粉が昆虫の体のどこに付着して受粉が起こり、それが植物種(花の形)と昆虫種により異なるという点について、理解できなかったという回答は3名であった。花粉発芽の最適条件については、ほぼ全員が理解できた(図3, ⑥~⑨)。また、植物種によって花粉発芽までの時間が異なることはほぼ全員理解できていたが、理解できないという回答が1名あった。理解できなかったという回答の理由としては、説明の理解不足、観察不足、理解不足などが考えられる。作業に集中しすぎたため説明を聞いていなかったことも考えられ、指導者の適宜指示が必要かもしれない。また、研修時間に対して作業量が多かったことも考えられ、十分な観察時間がなく、理解に至らなかったとも考えられる。

今回の研修内容について、学校での理科教育の指導に役立つかどうかという問(複数回答)に対しては、研修内容を授業に活用できると回答した教員は全員で、教材作りの基礎技術として役立てられると回答した教員が7名であった(図3)。

5. 2 教材としての評価と改良について

アンケート結果を基に教材としての評価について考察する。今回の研修では、1. 被子植物の花と送粉昆虫の形態的關係については、受講者10名のうち3名は理解できなかったと回答し、2. 花粉発芽の最適条件と植物種による違いについては1名が理解できなかったと回答した。改良点としては、十分な作業時間を確保するために、花形態の観察時に、4種の花を観察させることにしたが、これを2種にして作業を減らしたほうがよいと考えられる。今回開発した教材を用いた教員研修を実施することで、被子植物の花の多様化と昆虫との共進化を理解すると共に、花粉発芽の最適条件を理解することができ、本教材を用いた研修の意義を強く示す結果となった。

6. 結論

本論文では中学校の理科教員に対して、被子植物の花形態と送粉昆虫の口器形態の対応関係から花の多様化および花粉発芽実験の最適条件について理解するための教材を開発し実践した。開発した教材は、1. 被子植物の花と送粉昆虫の関係、2. 花粉発芽の最適条件についての講義・実習から構成されている。受講者は被子植物の花形態が送粉昆虫の関係によって多様化したことを理解し、花粉発芽の最適条件を理解できたという結果を得られた。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、東京学芸大学理科教員高度支援センターの松川正樹特命教授には、論文の企画、構成、内容に関して、教育に関する専門的視点より多くご指摘をしていただきましたことに対し、感謝の意を表します。

引用文献

- 有馬朗人ほか. 2016. 新版理科の世界3年, 大日本図書.
- Faegri K and van der Pijl L. 1979. The principles of pollination ecology. Third edition. Pergamon, Oxford, UK.
- 北海道立理科教育センター. 2008. http://www.ricen.hokkaido-c.ed.jp/293seibutu_pdf/tyu/h20_hatten/h20s_kafunkan.pdf (2017.5.15)
- 細矢治夫ほか. 2016. 自然の探究中学校理科3 教育出版.
- 兵庫県立教育研修所. 2004. <http://www.hyogo-c.ed.jp/~rikagaku/jjmanual/jikken/j03frame.htm> (2017.5.15)
- 池田和人. 1997. 花粉管の発育と教材化への検討, 北海道立理科教育センター研究紀要第9号, 85-86.
- 鹿児島県総合教育センター. 2005. 花粉管の観察, 実験のポイントと指導方法の工夫, 理科第253号, 1-4.
- 宮下直, 井鷲裕司, 千葉聡. 2013. 生物多様性と生態学, 朝倉書店.
- 文部科学省. 2008a. 小学校学習指導要領.
- 文部科学省. 2008b. 中学校学習指導要領.
- 文部科学省. 2008c. 中学校学習指導要領解説理科編.
- 岡村定矩ほか. 2016a. 新しい科学1年, 東京書籍.
- 岡村定矩ほか. 2016b. 新しい科学3年, 東京書籍.
- Proctor M, Yeo P, and Lack AJ. 1996. The natural history of pollination. Timber Press, Portland.
- 酒井章子. 2015. 送粉生態学調査法, 共立出版.
- 霜田光一ほか. 2016. 中学校科学3, 学校図書.
- Stebbins G. 1970. Adaptive radiation of reproductive characteristics in angiosperms. I: Pollination mechanisms. Annual Review of Ecology and Systematics 1: 307-326.
- 塚田捷ほか. 2016. 未来へ広がるサイエンス3, 啓林館.
- Waser NM, Chittka L, Price MV, Williams NM, and Ollerton J. 1996. Generalization in pollination systems, and why it matters. Ecology 77: 1043-1060.