

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：14302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350247

研究課題名(和文) ナミアゲハの植物への適応の生態学的研究とその成果に基づく探究教材開発および実践

研究課題名(英文) Basic ecological study on the adaptation of swallowtail butterfly to host plant, and its application to investigation learning in science education.

研究代表者

今井 健介 (Imai, Kensuke)

京都教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：80447888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：生物は自然界で生き残って子孫を残すよう、多様で精緻な「しくみ」や「ふるまい」を進化させているが、その教材活用の事例は少ない。生態学と理科教育の専門的研究者が協力し、教材開発を指向した新規の基礎研究を実施した。

外来植物ヘンルーダを与えて育てたナミアゲハ幼虫が、本来の寄主である柑橘類を与えても摂食せず、植物から逃げ出す現象を一部解明した。また、ヘンルーダを与えた場合の摂食行動と幼虫の成長率を調査し、ナミアゲハが外来植物ヘンルーダに未だ完全には適応していないことを明らかにした。これらの基礎研究の成果を基に、児童生徒が主体的にナミアゲハの「ふるまい」を探究するような学習教材のアイデアを提示した。

研究成果の概要(英文)：Structural and behavioral adaptations of living beings can provide much opportunity of learning science, but, in Japan, are not sufficiently used for education. Researchers of science education and evolutionary ecology collaborated to start new basic studies to propose new material for investigation learning.

We revealed why larvae of Asian swallowtail butterfly *Papilio xuthus* escape from native host plant citrus, when first reared on common rue *Ruta graveolens* and then replaced to citrus. It was suggested, when reared on *R. graveolens*, larvae become unable to consume mature citrus leaves harder than those of *R. graveolens*. We also suggested that *P. xuthus* of Japan is not yet perfectly adapted to *R. graveolens*, which is introduced to Japan in middle of the 19th century, by measuring efficiency of digestion and absorption, rate of food consumption, and feeding behavior. From our results of basic studies, several materials for investigation learning were proposed.

研究分野：生態学

キーワード：アゲハチョウ 寄主植物 進化生態学 理科教育 教材 昆虫 外来植物 探究学習

1. 研究開始当初の背景

今日の小中等教育においては、食物連鎖は生産者から高次消費者へといたる物質やエネルギーの流れとして捉えられている。このような視点においては、「食うもの」を見る際にそれがどれだけ生息してどれだけ捕食するかだけが興味の中心となり、「食われるもの」を考える際にはそれがどれだけ生息してどれだけ捕食されるかに関心が集中する。

しかし、食物連鎖の過程において、「食うもの」はただ食うだけではなく、「食われるもの」はただ食われるだけではない。両者はそれぞれ、効率よく食うための、あるいは食われないための多様な「しくみ」や「ふるまい」(適応)を進化させている。しかしながら、その巧緻さや多様性に注目し、児童生徒の自然界への理解を深めようとする取り組みは少ない。

ナミアゲハ *Papilio xuthus* とその寄主植物であるミカン科植物の関わりは小学校第3学年で「アゲハチョウの一生」などとして取り上げられ、飼育を通じて身近な生物に親しむ教材の代表格と言える。また、小学校第4学年での「生物の季節変化」、第6学年での「食物連鎖」、中学校理科第2分野での食物連鎖による「自然界のつり合い」等の教材でも用いられている。

本研究では、「ナミアゲハ」を食うもの、「ミカン科植物」を食われるものとして、両者の見せる巧緻なふるまいを児童生徒が探究できる教材の開発を目指した。

本研究の新規性は、理科教育の専門的研究者と生態学の専門的研究者が協働し、理科教材への応用を前提とした新規の進化生態学的基礎研究を実施した点にある。本研究では理科教育を専門とする研究分担者が現職教員との関わりや自身の2007年以降の授業実践から生じた課題を抽出した。この課題に応じて生態学を専門とする研究者が基礎研究を行い、その課題の背景にある生態学的要因の一部を明らかにした。基礎研究の成果は、両研究者により検討され、その一部から新たな探究学習教材のアイデアが提出された。この一連のプロセスを持つ本研究は、実践的な課題を検証する実証的研究のモデルであるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、基礎研究段階として、ナミアゲハが通常利用している柑橘類に対して持つ適応を明らかにする。ナミアゲハの行動や成長を、ナミアゲハが適応している柑橘類を餌として与えた場合の適応(効率的行動)と、ナミアゲハが餌として利用していないミカン科外来植物を与えた場合の非適応(非効率的行動)を比較検討した。

後者の外来植物として、ヘンルーダ *Ruta graveolens* (教育現場ではアゲハソウとも呼称される)を用いた。ヘンルーダは多くの教

育実践や学術研究でナミアゲハの飼育に用いられているが、明治期にヨーロッパから日本に持ち込まれた外来植物である。そのため、日本産ナミアゲハはヘンルーダに十分適応していないと考えられる。

基礎研究段階ではヘンルーダとカンキツでそれぞれ飼育した場合において、同化率や吸収率のような食物の利用効率を比較した。また、ナミアゲハがカンキツ類を利用する際の行動とヘンルーダを利用する際の行動を比較した。

応用的研究段階としては、基礎研究の過程でカンキツへの適応とヘンルーダへの非適応が顕著に表れた事例を選び出し、2種の植物への適応レベルの違いを観察できるような簡易な手法を立案することを目的とした。小学生～高校生がこれらの手法を用いてナミアゲハの行動や生態を主体的に探究できるような学習素材を提案する。

3. 研究の方法

(1) 教育現場および理科教育カリキュラムからのフィードバック

理科教育の専門的研究者である研究分担者が、教育実践活動および現職教員との連携の中で情報を収集・整理した。収集・整理の対象としたのはナミアゲハなど生物飼育の授業に関する技術的課題や授業実践から得られる体験的・断片的知見である。収集した情報は、本研究の基礎研究段階へとフィードバックされた。

また、学校教育カリキュラムの現状を再検討し、生きものを用いた探究学習の望ましい姿を検討した。

(2) 供試植物種の変更実験

室温条件下に置いたプラスチックカップ(深さ6cm×直径14cm)に、ヘンルーダで飼育された5令幼虫1個体を収容し、ナツミカンの成葉の切片(1cm四方)とほぼ同じ大きさのヘンルーダの葉を同時に与え、その後の1時間に幼虫がどちらの葉を摂食するかを観察した。実験開始時には、幼虫の半数(n=6)はヘンルーダ葉上、残りの半数(n=6)はナツミカン葉上に静置した。

また、脱皮直後の5令幼虫を単一の寄主植物とともに小型の透明容器(アズワンスチロール角型ケース8型;内寸法(mm):140×76×25)に閉じ込め、強制的に摂食させる実験を行った。ヘンルーダのみを与える処理(n=4)と、ナツミカンの若く柔らかい葉のみを与える処理(n=4)、ナツミカンの硬く成熟した葉のみを与える処理(n=4)を行い、蛹までの生存率を比較した。飼育は室温条件下で実施した。

さらに、ヘンルーダからナツミカンへエサを変更する時期を実験的に操作した。エサの変更時期は、2令幼虫期のはじめ(n=9)、3令幼虫期のはじめ(n=6)、4令幼虫期のはじめ(n=7)、5令幼虫期のはじめ(n=7)の4つ

を設定した。エサの変更時期と供試個体の蛹化までの生存率の関係を解析した。飼育は16L8Dの長日条件下、27の温度設定で実施した。

(3) 植物の利用効率の比較

ヘンルーダとナツミカンのいずれかを半強制的に利用させて、16L8Dの長日条件下、27の温度設定における幼虫の成長を比較した。小型の透明容器(アズワンステロール角型ケース8型;内寸法(mm):140×76×25)の中に1令幼虫1頭とヘンルーダ(n=26)あるいはナツミカン(n=29)の葉を入れ、死亡するか蛹になるまで飼育し、各個体の各令期におけるエサ摂食量(乾燥重量)と、排出した糞の乾燥重量、体重の増分(湿重量)、各令期の長さを測定した。

(4) 植物体上での幼虫の行動

ヘンルーダ20株(高さ50cm程度)の鉢植えを準備し、それぞれに1令幼虫2頭ずつを導入して、蛹化するまで飼育した。幼虫の植物上の位置や行動、植物の変化等を毎日1回観察した。また、別にヘンルーダの鉢植え上で幼虫を飼育し、5令幼虫期の約2日間、ビデオ撮影による行動の観察を行った。

4. 研究成果

(1) 教育現場および理科教育カリキュラムからのフィードバック

2007年以降、理科教育の専門的研究者である研究分担者は、現職教員のナミアゲハ飼育授業スキルの向上を意図し、ヘンルーダ苗の無償供与とナミアゲハの飼育方法の指導を行っている。本科研費の期間は飼育指導の回数を増やし、現職教員からの情報収集を行った。

また、出張授業として小学校3年生向けの探究型授業である「アゲハチョウの不思議」を2007年以降実施している。2007年以降に得られた経験を基礎研究へとフィードバックした。また、科研費期間中の同授業には、本研究の基礎研究段階から得られた生態学的知見を授業内容に反映させた。

これらの情報収集の取り組みによって、後述する「ナミアゲハのエサをヘンルーダから柑橘類に切り替えると、幼虫が植物上から逃亡してしまう現象」や「ヘンルーダで飼育した幼虫が、ヘンルーダの葉や茎を切断する現象」、「鉢植えのヘンルーダで飼育した幼虫が鉢植えの下によく落下する現象」などについての情報が得られた。これらの情報は、後述する基礎研究の課題としてフィードバックされた。

また理科教育の現状を精査した結果、児童生徒が飼育・栽培を通じて生きものを育てる体験をし、また、観察によって生きものの行動や生態を知り、生きものと環境とのつながりを認識することが重要であることが改めて確認された。従来型の飼育授業の多くは、

小さな容器にいった柑橘類の枝をエサとするものである。このような授業には、成虫による植物への産卵行動や幼虫が樹上を活発に移動する様子は捉えきれないという問題がある。これらの重要な行動を観察するための教材としては、本研究でも用いるヘンルーダの鉢植えによる飼育が有効であると考えられた。

(2) 供試植物種の変更実験

飼育体験授業で教員や児童・生徒から最も多く寄せられる疑問もしくは問題点は、ヘンルーダで飼育している幼虫をミカン葉などの飼育に切り替えると、幼虫が摂食せずに葉から逃げだしてしまう現象である。この現象を説明するための生態学的基礎研究を行った。得られた知見は、単に児童生徒に教え込む知識として現場にフィードバックするのではなく、授業の場で逃走行動を観察し、その理由の探究プロセスを授業に活用する探究学習教材としてのフィードバックを目指した。

基礎研究

ヘンルーダで飼育した幼虫がナツミカンの忌避を示すことを実験的に示した。ヘンルーダで5齢まで飼育した幼虫を、ヘンルーダの葉片とナツミカンの葉片を入れた容器に入れ、行動を観察した。はじめにヘンルーダの葉片の上に導入された幼虫には葉片上から脱出した個体はおらず、その一方、はじめにナツミカンにのせた個体は66.7%(4/6)が脱出した。

調査の結果、忌避が生じたのは、飼育の途上で幼虫の形質が変化し、ナツミカンを利用できなくなるように変化したためである可能性が明らかになった。ヘンルーダを与えて飼育した幼虫を準備し、4頭にはヘンルーダをそのまま与え、別の4頭にはナツミカンの成葉を与え、その後の生存率を比較した。その結果、ナツミカンの成葉で飼育した幼虫はすべて死亡した。死亡した個体は葉の縁をなぞるような浅い食痕ばかりを残しており、ほとんどナツミカン成葉を摂食できていなかった。

ナツミカンの成葉を与えた際に死亡が起こったのはヘンルーダの柔らかい葉上で育った幼虫が、硬い葉の利用能力を失っているためである可能性がある。この可能性は、同様の実験でナツミカンの柔らかい若葉を与えた場合、供試個体の75%(n=4)が十分な摂食を行い、蛹化まで生存できたことから示唆される。

ヘンルーダをエサとして成長したときの変化が、成長のどの段階で生じたのかを明らかにするために、ヘンルーダで飼育した幼虫を2令幼虫期の最初にナツミカンへ移す処理から、5令幼虫期の最初にナツミカンへ移す処理までの4つの処理区を作り、卵のふ化から蛹になるまでの生存率を比較したとこ

る、顕著に生存率が低下したのは、5令幼虫の初期に移した処理だけであった。

本調査の結果は、ナミアゲハの幼虫が葉の柔らかい植物で育った場合には(不要な)硬い葉の利用能力を発達させず、成長にともなって葉の硬くなるナツミカンのような植物で育った場合には硬い葉を利用できるように成長するという適応的な表現型スイッチングの可能性を示唆している。さらにエビデンスを積み重ね、ナミアゲハの忌避行動の意味を探る探究的学習へと昇華させることが期待される。

探究活動を想定したプロセスの提案

本研究の基礎研究で得られた知見から、主には高校生物関連の課題研究を想定した探究プロセスの提案が可能である。意図的にエサを変えることにより、逃走行動を起こさせ、その機構を探る授業デザインを検討し、以下のようなアイデアを得た。

まず、柑橘類からの逃走が再現性を持って起こることを示して、生徒の関心を引く。本研究で用いた個別飼育、エサ植物の交換、食痕形状の観察、生存率の測定などの様々なアプローチは学校現場でも充分実行可能である。利用可能な研究手法の一部を生徒に示して、その後は生徒の自由試行により忌避を引き起こす究極要因と至近要因の解明を促す。最終的には、自らの研究成果の正当性や意義を批判的に検討させることで科学の手法を理解させる。

本調査の意義と課題

本調査および本科研究費研究は、理科教育的な実践(経験)から抽出された課題を基礎研究で検討し、理科教育に探究活動としてフィードバックさせようとしたモデルケースとしての意義がある。生態学の専門的研究者と教育実践の専門的研究者の協働のあり方を検討することが今後の課題である。特に、新たな教材開発に資するような課題抽出の方法、基礎研究段階でどの程度のエビデンスを収集するべきであるか、研究成果の教材としてのフィードバックのあり方などが重点的に検討すべき課題である。

(3) 植物の利用効率の比較

ヘンルーダは学校教材としてすでに利用されている。しかし、ナミアゲハにとって本来馴染みのないヘンルーダを用いた観察が、どの程度、実際のアゲハチョウの生態を反映しているのかについては、研究の余地がある。本調査では生態学の専門研究者からの、教育実践に対する働きかけとしてアゲハチョウのヘンルーダに対する適応の程度を検討し、またその成果と手法を利用した探究プロセスのアイデアを提示する。

基礎研究

ヘンルーダ(n=26)とナツミカン(n=29)を

用いて、それぞれの植物でナミアゲハを飼育した場合の、各令幼虫期におけるエサの摂食量、フンとしての排出量、体重の増加量を測定した。これを基に植物のエサ質の指標となる同化率($(\text{摂食量}-\text{排出量})\div\text{摂食量}$)と、吸収率($\text{体重増加量}\div(\text{摂食量}-\text{排出量})$)を求めた。

栄養的な質を総合的に評価するとヘンルーダはナツミカンよりも優れたエサであった。エサとしての総合的な質を表す同化率と吸収率の積(=体重増加量 \div 摂食量)はヘンルーダの方が高く、潜在的に良いエサであることを示している。

しかしながら、摂食行動の活発さを示す1令から蛹化までを通算した摂食量はナツミカンをエサとした場合が有意に高かった(t検定、 $p<0.0001$)。一方、ヘンルーダは良いエサであるにもかかわらず、ナミアゲハにはあまり摂食されなかった。このことは、外来種であるヘンルーダにナミアゲハがまだ適応しておらず、ヘンルーダの質の良さをうまく評価し、積極的に利用できていない可能性を示唆している。

結果的にヘンルーダで成長した幼虫はナツミカンで飼育した幼虫よりも成長が悪かった。ヘンルーダで飼育した場合とナツミカンで飼育した場合には幼虫の成長の速さ(各幼虫令期の期間)には有意な差は無かった(t検定、 $p=0.78$)が、一方、蛹化直後の蛹の重量は、ヘンルーダで飼育した場合の方が、ナツミカンで飼育した場合よりも有意に軽かった(t検定、 $p=0.0003$)。

また、ヘンルーダはナツミカンに比べて、1令から蛹化までを通算した同化率に有意に優れる(t検定、 $p<0.0001$)半面、吸収率に劣るエサであることが判明した(t検定、 $p=0.029$)。同化率が優れているのは葉が軟質で、繊維にとぼしく、フンとして排出されるものの量が少ないためと考えられる。また、吸収率が低いことは、体内に消化吸収した物質が、体の成長に結びついていないことを示している。このことは、ナミアゲハがヘンルーダの化学成分をうまく処理できていない可能性を示唆している。

本調査は、ナミアゲハにとってヘンルーダが栄養的に良いエサであるにもかかわらず摂食行動が活発でないこと、その結果蛹になる際の体重が低くなること、ヘンルーダの吸収率が低いことを示し、ナミアゲハがまだヘンルーダに適応出来ていない可能性を示唆している。さらに基礎研究を重ね、今回明らかになったナミアゲハのヘンルーダへの非適応が、ヘンルーダを用いた観察学習に与える影響を評価する必要がある。

探究活動を想定したプロセスの提案

上記の基礎研究は、(2)の実験と同様に高校生にも実行可能な手法で実施されている。本調査の結果を教材としてフィードバックする手法を検討し、以下のアイデアを得た。

高校生物で学習する一次消費者の摂食量、同化量、吸収量、呼吸量、排出量は通常、ある生態系における総量という抽象的な値として学習されるため、実感を伴った理解は難しい。そこで、これらのパラメータを生態系の総量として学習した後に、スケールダウンし、ナミアゲハという特定の生物を用いて測定する。これにより、上記パラメータの具体的な理解が促進されるものと期待される。

本調査の意義と課題

本調査は、生態学の専門的研究者が理科教育的実践の現状についての研究と検討を行って、その妥当性を確認するとともに、新たな教材開発の可能性を模索するモデルケースである。研究成果のフィードバックにおいて、理科教育の専門的研究者と生態学の専門的研究者がいかに協働すべきかが今後の課題である。

(4) 植物体上での幼虫の行動

本研究における小容器内での個別飼育において、ヘンルーダを摂食中の幼虫が、本来摂食可能な葉の先端部を切りとり、落下させてしまうという異常な現象が観察された。また、現場での教育実践からのフィードバックにより、ヘンルーダの鉢植えで集団飼育している幼虫がしばしば鉢から落下するという情報が得られた。

基礎研究

ヘンルーダ 20 株の上で計 40 頭の幼虫を飼育して定期観察した結果、葉片の落下が顕著に見られ、実際の植物体上でも葉の切り落としが生じていることが判明した。

幼虫の摂食行動を観察し、その原因を調査した。幼虫は柑橘類の葉であれば、葉縁から摂食を開始し、葉の主脈で摂食を止める様子が観察される。しかし、主脈の発達していないヘンルーダでは、主脈に到達しても摂食を止めず、葉を横断するように摂食を進め、結果的に葉を二分して、葉先部を落下させた。

本調査の過程では教育現場で観察されるような幼虫の落下は観察されなかった。しかし、しばしば葉のついた枝の落下が観察された。幼虫の落下は、比較的柔らかなヘンルーダの茎を幼虫がかみ切り、結果的に他個体の落下を引き起こしている可能性がある。葉片や茎の噛みきりの究極要因や至近要因について、さらなる基礎研究の必要がある。

探究活動を想定したプロセスの提案

ヘンルーダを用いた飼育観察では、従来型のケージ内でカンキツ類を供試する飼育観察と異なり、立体的に枝が展開する 3 次元構造の中で、幼虫がどのように巧妙に振る舞っているかを観察可能である。

葉片や茎の切断の痕跡は、飼育の際に容易に観察できるため、その理由を解き明かすような探究活動に利用可能であると思われる。

また、本調査では以下の様な行動を観察している。これらの行動も、探究活動の素材として利用可能であろうと考えられる。

- ・幼虫はいつも摂食しているのではなく、摂食と休憩を交互に繰り返しながら、一日を過ごすこと。
- ・休憩場所は摂食場所からかなり離れた位置に決まることが多いこと。
- ・休憩場所が何度も再利用されること。
- ・はじめて休憩場所にやってきた際には、頭を左右に振りながら、その近傍を歩き回ること（おそらく体を固定・足場を安定させるための糸を張っている）。
- ・葉の上の休憩場所では、必ず頭を茎の側に向けて休み、茎の方から侵入してきた他個体を、頭を振って追い払うこと。
- ・柔らかいヘンルーダの葉を摂食する際には、落下しないように尾脚で葉柄をつかみ、そこから頭の届く範囲で摂食すること。

今後の課題

基礎研究では、上記の観察事項についてさらなる調査を行って再現性を確かめ、その至近要因と究極要因を明らかにすることで、探究活動において到達すべき結論を設定する必要がある。

応用面の課題は、長時間の行動を観察するためにはウェブカメラやハードディスクレコーダなど ICT 機器が必要となることである。児童生徒が主体的に探究活動を行う中で、これらの機器をスムーズに導入するための環境設定を検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 2 件)

村上忠幸、今井健介他 京都教育大学「アゲハソウネットワークを発展させるためのプロジェクトの構築(3)平成 26 年度京都教育大学教育改革・改善プロジェクト報告書」2015、22

村上忠幸、今井健介他 京都教育大学「アゲハソウネットワークを発展させるためのプロジェクトの構築(2)平成 25 年度京都教育大学教育改革・改善プロジェクト報告書」2014、29

〔その他〕

ホームページ等

京都新聞、ソフィアがやってきた、「チョウの不思議に触れてみよう」2014 年 9 月 21 日

<http://natsci.kyokyo-u.ac.jp/~imai/index.php/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 健介 (IMAI, Kensuke)
京都教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：80447888

(2) 研究分担者

村上 忠幸 (MURAKAMI, Tadayuki)
京都教育大学・教育学部・教授
研究者番号：20314297