

葉面密閉と葉表面温度測定を取り入れた光合成の教材開発

正 元 和 盛・柴田彩緒里・小 宮 良 基^{*1}・坂 本 祐 輔^{*2}

The Development of Teaching Materials on Photosynthesis Focusing on the Measurement of the Surface Temperature of Leaves on a Sealed Leaf Surface

Kazumori MASAMOTO, Saori SHIBATA, Yoshiki KOMIYA^{*1}, Yusuke SAKAMOTO^{*2}

(Received October 1, 2014)

In order to clarify the cooling effect from the transpiration of leaves, we measured the temperature of the face-side surface of leaves which were attached to a polyethylene sheet on the back half-side of the leaves, as well as using a thermo-camera, using simple radiation thermometers which are found in the science classes of elementary and lower secondary schools. After taking the measurements, the leaves were directly measured for amount of starch accumulated through photosynthesis, using Tatakizome method. This experimental method for students provides a new tool for the creation of teaching materials which foster scientific thinking.

Key words : Transpiration, Thermography, Radiation thermometer, scientific thinking

1. はじめに

生活の中でも赤外線サーモグラフィカメラ（赤外線カメラ）の熱画像を目にすることや放射温度計による体温測定など、表面温度測定機器が身近な例として感じられるようになってきている。学習指導要領¹⁾では小学校第3学年（A 物質・エネルギー（3）光の性質, B 生命・地球（3）太陽と地面の様子）の単元で、放射温度計の利用を示唆していて、この単元の小学校理科教科書^{2, 3)}ばかりでなく中学校理科教科書⁴⁾でも、その使用例が示されるなど、教材教具としての活用が取り上げられている。また、赤外線カメラによる熱画像も、4年もののあたためり方の単元で資料データとして教科書²⁾例示されている。しかし赤外線カメラや放射温度計の利用は、教科書の「生命領域」のなかではみられない。そこで、そのような表面温度測定機器を使って、植物での蒸散機能の教材開発を行った。

中学校での蒸散実験では、葉の表面と裏面にワセリン塗布して気孔を塞ぎ、葉面を密閉することで、葉の裏面から主に蒸散をおこなっていることを学習

する⁴⁾。この蒸散という「働き」と、気孔が葉の裏面に多く存在するという「つくり」を関連付けて、蒸散による水蒸気の放出は、主に気孔からが出ていくことで行われると理解させる。小学校第6学年では、植物個体全体をビニール袋でおおい密閉し、その内面に水滴が凝着することで蒸散を確認する実験などが行われている²⁾。また、植物機能測定の教具として、検知管による気体濃度変化の測定が扱われている⁴⁾。

本研究では、教科書に用いられているワセリン塗布による蒸散抑制に代わるものとして開発されたポリ袋材による葉面密閉法⁵⁾の改良をおこなった。1枚の葉での密閉、非密閉側での葉温の変化を熱画像、及び簡易な放射温度計で測定し、蒸散による冷却効果を検証し、さらにそこでの光合成産物デンプンの蓄積量の違いも検証した。測定植物にはカラムシに加え、教科書で取り扱われるアジサイも用いた。

2. 材料と方法

蒸散抑制を、葉にワセリンを塗って葉面を密閉す

^{*1} 熊本大学教育学部（当時）

^{*2} 熊本大学大学院教育学研究科（当時）

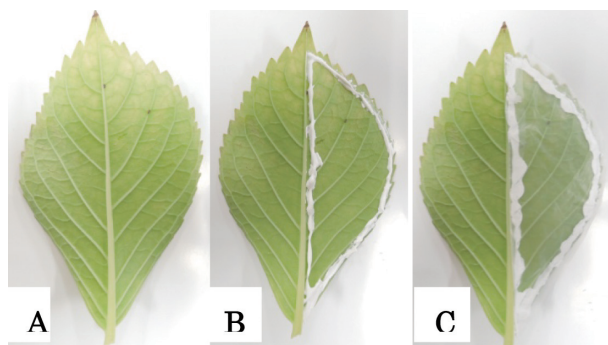


図1 葉裏面片側へのポリ材の貼り付け（半葉面密閉）の様子

A：葉裏面，B：片側へのボンド付け，C：ポリ材をボンドにあわせて貼り付ける。

る代わりに、ポリ材を葉面に貼付けて密閉する方法がある。この葉面密閉法⁵⁾を、1枚の葉裏全面ではなく1枚の葉裏面の片側だけを密閉する改良を行った（図1）。植物材料は、学校敷地内によくみられるカラムシ（*Boehmeria nivea* var. *nipononivea*）、及び教科書での実験材料としてよく使われるアジサイ（*Hydrangea macrophylla*）を使用した。ポリ材としては半透明ゴミ収集袋45 L（10枚組，KK ジャパックス）を1枚の葉の片側の形に切り取り、ボンドカベコークノンブリード（コニシ KK）を葉裏面片側の形に塗った上に、重ねるようにかぶせ隙間ができないように貼付けた（図1）。屋外実験での葉面片側への貼付けは、葉片側の形に切り取ったポリ材の縁にボンドを塗って、葉裏面片側に重ねるようにかぶせて貼付けた。

温湿照度はミスター省エネ（温湿照度ノード，SW-3210，セイコーインスツル KK）で測定した。葉表面温度は、赤外線サーモグラフィー testo 885-2（testo KK），及び理科教具として学校現場で使われている赤外線放射温度計 AD-5611A，AD-5613A（エー・アンド・デイ KK；以下 AD-5611A，AD-5613A と表示）を用いて、1枚の葉の密閉側，同一葉内での無処理側でその葉温を測定した。赤外線サーモグラフィー testo 885-2 の性能は testo KK のホームページ⁶⁾を参照されたい。

(1) 屋外での実験

カラムシは地植えのものを平成25年10月16日11:00から2時間おきに測定した（図2）。（測定時の温度，湿度，照度はそれぞれ（19.4，20.2，21.9，18.5℃），（65，59，50，55 %RH），（3700，4700，14000，1000 lux）であった。

アジサイは300 mL 三角フラスコに水さしたもので室内に保持しておいたものを，屋外で10月21日（晴れ）13:30から1時間おきに測定した。測定

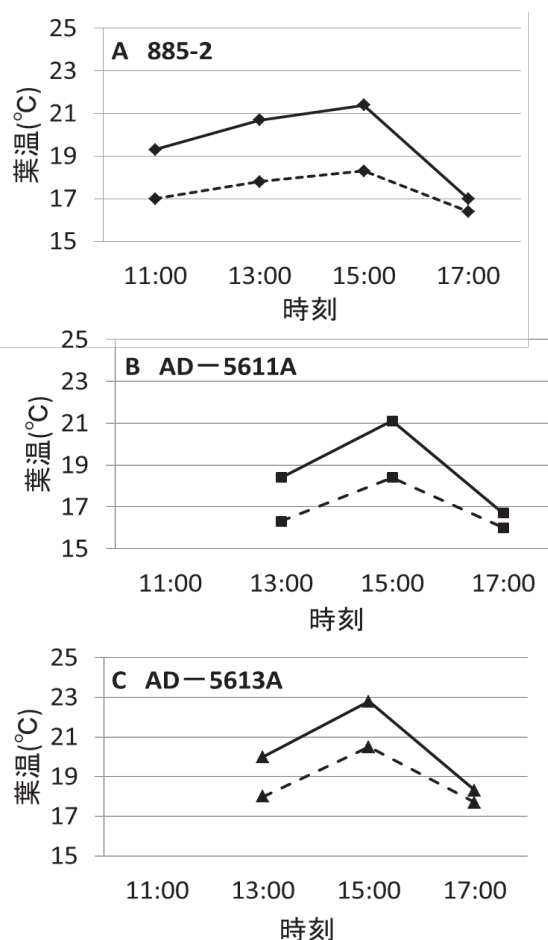


図2 カラムシ葉を半葉面密閉した時の葉表面温度経過

実線：密閉側，破線：無処理側の葉表面温度。A：赤外線カメラ，B，C：放射温度計での測定。

時の温度，湿度，照度はそれぞれ（38.0，33.7，29.0℃），（25，32，42 %RH），（24500，17900，10400 lux）（図3）。測定終了後に，葉の無処理，ポリ材葉面密閉処理の部分を2cm × 2cm 切り取り，たたき染め⁷⁾を行った。

(2) 屋内での実験

室内でのアジサイ1枚の葉の葉面密閉側，無処理側の中央部への部分的な光照射には，2-（1）同様にセットし光照射実験前に1日暗所に置いたアジサイを使用した。室内での光照射は，顕微鏡用光源ツイン LED 照明（HAD-TW3，林時計工業 KK）で8cmの距離から照射した（室温24℃，湿度54 %RH，照度約60 klux）。葉温変化は885-2で測定した。照射後，それぞれの照射部分を含んだ葉片を4 × 2 cm 切り出し，たたき染めを行った（図7）。

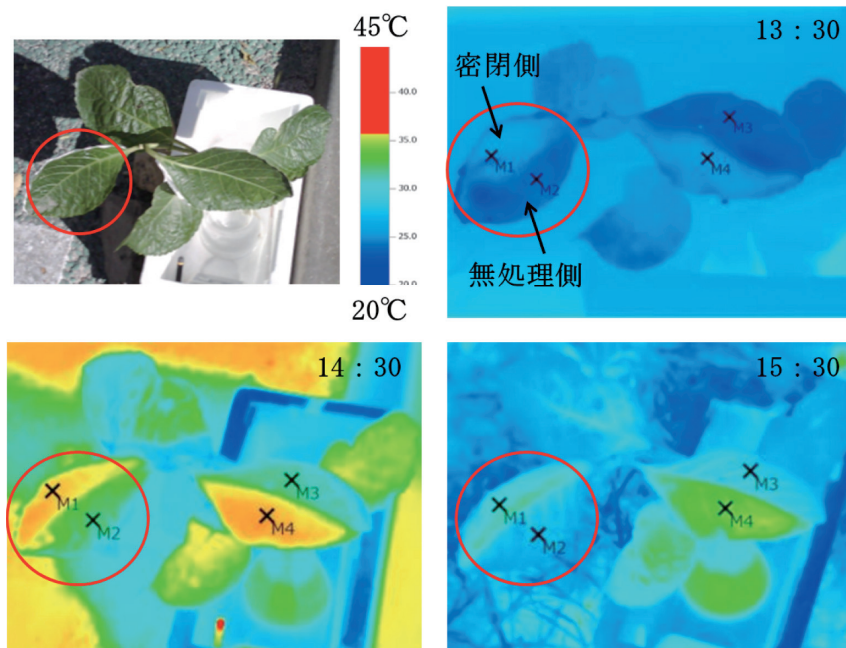


図3 アジサイ葉の半葉面密閉での実画像、熱画像

屋外設置した水切り茎葉のアジサイ葉(実画像, 熱画像で左: 密閉側, 右: 無処理側)の葉温の変化を示す。表示温度範囲は20～45℃。885-2で測定し葉温を読み取った。同時に簡易な放射温度計AD-5611A, AD-5613Aでも測定した。右側2枚目の葉も同様に処理してある。

3. 結果と考察

葉面密閉法⁵⁾を用いて蒸散抑制を行った時、蒸散速度は、ビニール処理とワセリン処理は無処理の1/10程度となり、ワセリン処理同様に蒸散抑制効果があること、葉表面の温度については、蒸散速度が大きい無処理の葉温が低くなりビニール処理やワセリン処理では葉温が高くなるため、蒸散の冷却効果を示すことができる。葉面密閉法はワセリン処理に比べ1) 蒸散実験後にたたき染めなどの実験に利用可能、2) べたつかず塗りムラが出る心配がない、3) 蒸散が気孔から水蒸気が出て行くことなどの仕組みが理解できるという点で優れている。また、ビニール法を用いた葉のたたき染め法による光合成産物の検出は、無処理、表側面ビニール処理はヨウ素デンプン反応を同様に示したが、裏側面ビニール処理はヨウ素デンプン反応が小さかったと報告されている⁵⁾。この葉面密閉法⁵⁾を、より比較を明確にするため、1枚の葉の片側で行うように改良した。

(1) 屋外での葉表面温度測定

1) カラムシを用いた実験

葉の密閉側片側のポリ材表面は、30分後には水滴がつき始めて白くなった。その後の葉温を測定すると、密閉側は13:00には885-2での測定で20.7℃(無処理側との葉温差は2.9℃)と最も高くなり、

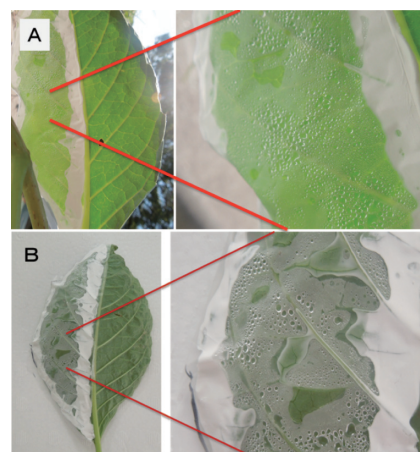


図4 アジサイ葉表面でのポリ材への水凝着
A: 30分後, B: 2時間後(図3での測定)

17:00には17.0℃(葉温差は0.6℃)と下がった(図2-A)。同様な温度変化が、学校現場で使われている簡易な放射温度計でも同様に測定できた(図2-B, C)。11:00の測定は、セットして10分程度経過なので参考に885-2のみで測定した。測定終了後(17:00)、葉の密閉側、無処理側の部分を切り出し、たたき染め法でデンプン検出を行った所、無処理側では十分なヨウ素デンプン反応が見られ、密閉側でもうすぐヨウ素デンプン反応がみられた。密閉側でのデンプン蓄積は、日の出から11:00にセットするまでの光合成によるデンプン蓄積とも考えられるが、表側面での気孔からの二酸化炭素の出入りがわ

表 1 葉面半密閉アジサイ葉での葉温測定

機器	885-2	AD-5611A	AD-5613A
		($^{\circ}\text{C}$)	
密閉側	40.5	39.0	39.9
無処理側	31.8	31.8	32.9
葉温差	8.7	7.2	7.0

屋外に設置 (図 3) し, 1 時間後 (14:30) の測定値

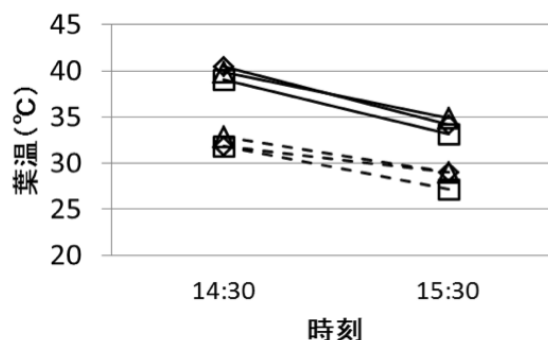


図 5 葉面半密閉アジサイ葉での測定時の葉温
 ひし形: 885-2, 四角: AD-5611A, 三角: AD-5613A. 実線: 密閉側, 破線: 無処理側. 図 3 での測定をプロットした.

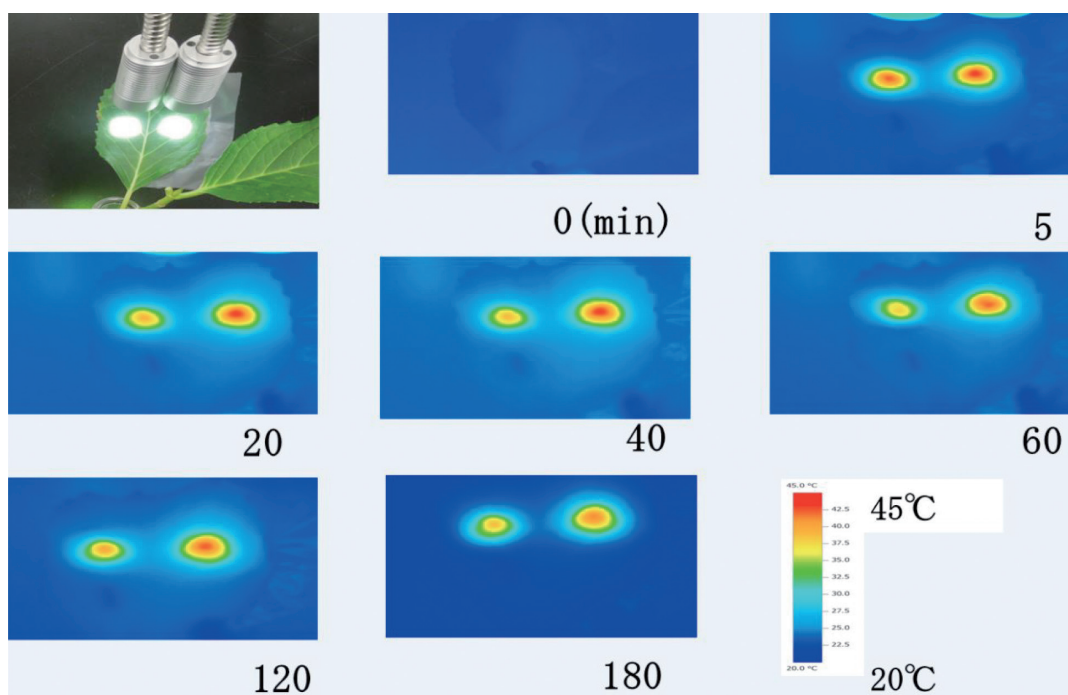


図 6 アジサイ葉裏面半密閉の LED 部分照射での葉温変化

アジサイ葉の左: 無処理側, 右: 密閉側. 表示温度範囲は 20 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$. 照度は約 60,000 lux.

ずかあり光合成がおこることや, 前日の光合成デンプン蓄積の残りの可能性を排除できない. 屋外での実験で, 密閉側でのデンプン蓄積が極めて少ないことを示すには, 実験葉でのデンプン残存がないように前日からセットするなどの必要があると考えられる.

2) アジサイを用いた実験

水さしアジサイ葉を屋外直射日光下にセットした. 出したすぐは葉温全体も低い (図 3-13:30) が, 駐輪場アスファルト上なので地表温度は 41.5 $^{\circ}\text{C}$ になっていた. 密閉側裏面は 30 分後には水滴が十分に観察され, 2 時間後には水が裏面の密閉ポリ材と

の間に溜まっていた (図 4). 直射日光下で 14:30 には, 密閉側, 無処理側の葉温は 40.5 $^{\circ}\text{C}$, 31.8 $^{\circ}\text{C}$ と, その差 8.7 $^{\circ}\text{C}$ を示し, 蒸散の冷却効果を充分に示した (表 1, 図 3). 学校教材として使用される安価な簡易の放射温度計 (AD-5611A, AD-5613A) でも, 同様に測定できた (表 1, 図 5). このことは学校現場で小・中学生にも, 充分に植物蒸散機能の測定が可能なことを示唆する.

たたき染め法により密閉部分, 無処理部分での光合成産物デンプン蓄積量の違いを調べた. 密閉により蒸散が抑えられ, 葉裏面での二酸化炭素の出入りもできなくなった部分は, ヨウ素デンプン反応によ

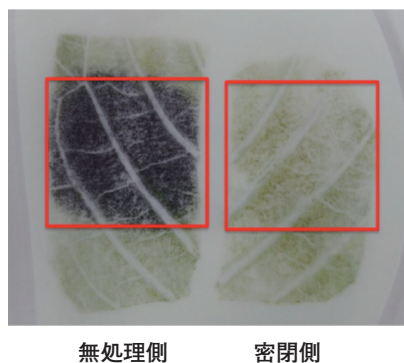


図7 半葉面密閉アジサイ葉での部分照射後のデンプン検出

材料と方法2-(2)参照.

る発色も薄く、光合成もほとんど行われていなかった。密閉側での光合成産物デンプン検出の原因が、前日以前の残存なのか等は確認する必要がある。

(2) 室内での葉表面温度測定

水さしアジサイの1枚の葉の密閉側、無処理側の中央部分をツインLED照明でそれぞれ照射した(図6)。密閉側、無処理側の葉温差は40分後に最大4.3℃となった。無処理側も照射開始後葉温が上がるものの、その後蒸散冷却機能により葉温が下がっていった(図6, 0-20 min)。それに比較して、密閉側は高い葉温を保ったままである(図6, 5-180 min)。測定終了後密閉処理葉裏側のポリ材をみると、光を照射した円形部分を中心に水滴凝着が見られた。また、密閉側と無処理側の葉片でたたき染めを行うと、無処理側の中央部(照射部分)に局所的なヨウ素デンプン反応の濃い部分が見られ、密閉側には照射部分であってもほとんどヨウ素デンプン反応は見られなかった(図7)。密閉側の照射部分では水滴凝着が見られるので、このことは、この程度の蒸散があってもデンプン蓄積をするほどの光合成はしていないことを示す。つまり、光合成三要素のひとつである二酸化炭素の取り込みが葉面密閉処理によって遮断され、密閉部分にあるわずかな二酸化炭素を使い果たすと光合成は止まるが、蒸散はそれと同時に止まらない、つまり気孔は完全には閉じていないことが考えられる。また、光が当たっていない密閉側部分では、水滴凝着が見られなかったので、この部分の葉では気孔は閉じていることが考えられる。本実験は、光合成三要素(光、二酸化炭素、水)の関連を考察する良い教材を提供すると考える。

植物葉での蒸散による冷却効果は、小学校理科教科書では発展として植物カーテンの例²⁾が載っており、そのことの赤外線カメラによる測定の教材開発もなされている⁸⁾が、中学校理科教科書では、蒸散機能については学習するものの冷却効果については

直接の言及はない。本研究が明らかにしたように、葉での蒸散による冷却効果は1枚の葉の片側に葉面密閉法を用いることで、赤外線カメラを用いなくとも小・中学校で教具として使用している簡易な放射温度計でも測定可能なことが明確に示された。また、葉面密閉法の特徴として、測定葉をたたき染めでの光合成デンプン検出に直接使えることから、光合成での蒸散、二酸化炭素、光、デンプンの関連を児童・生徒自らの実験で確認できることを示す。このことは、児童・生徒自らがその知識を活用して仮説を立て、実験計画を立案し技能を駆使して実行することを可能にする、と考える。従って、本実験方法の開発は、児童・生徒の科学的思考力育成の手法の一つとしての素材を提供すると考える。

更に論理的思考力育成の教材として、本実験の発展として1枚の葉の片側の1/4ずつの表または裏を透明ビニール材で密閉し、同時にもう一方の片側1/4の表裏をアルミホイルで覆う実験を行うなら、光エネルギーを遮断することなく光合成を阻害できる部位、光エネルギーを遮断して光合成を阻害する部位、葉の表裏の特性を確認する部位の同時実験設定が可能である。その葉のたたき染めを行い、1枚の葉左右1/4ずつでのヨウ素デンプン反応を比較することにより、二酸化炭素、光が光合成に必要なことを示すと同時に葉の表裏での気孔密度を推測することが可能になると考える。小学校の段階で児童は検知管の操作技術を修得している²⁾ので、この実験の前時に、植物個体をビニール袋で覆う実験でビニール袋への水の凝着と同時に二酸化炭素の減少を測定することも可能である。このように複数の視点から、光合成と二酸化炭素の関連を考察することは、思考力育成の面からも有用であると考えられる。光合成の式自体は、小学校でも学習する²⁾ことなので、そのことを小学校児童が自らの実験によって確認することになるので、より実感を伴った理解につながる、と考える。光合成の特性は中学校では第1学年で学習する⁴⁾が、本実験は勿論、中学校でも実施可能である。光合成理解について、小学校第6学年段階、中学校第1学年段階での連続を配慮し、既知知識技能を配慮した実験構成、素材、授業デザイン、単元構成などは今後の課題である。

4. まとめ

葉面密閉法⁵⁾を葉の裏面片側だけに施すという改良を行い、小・中学校教具の放射温度計でも葉温差を確認できたことから、葉温の違いが個葉差や光の

当たり具合ではなく、蒸散による冷却効果であるという根拠づけをより明確に示すことができた。実験後測定葉を直接たたき染めでの光合成デンプン検出に使えるので、児童・生徒は、光合成と蒸散、二酸化炭素の関連を自らの実験で確認できる。本実験方法は、児童生徒の科学的思考力育成の手法の一つを提供すると示唆される。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤研究（C）, 課題番号 25350257）の助成を得た。

参考文献

- 1) 文部科学省：「小学校学習指導要領解説 理科編」,

- p24, p31, 2008, 大日本図書.
- 2) 有馬朗人ら：「たのしい理科 3 年, 4 年 -2, 6 年 -1」, p83, p91; pp.34-35; p49, pp.52-54, p69; 平成 24 年, 大日本図書.
- 3) 大隅ほか 43 名：「わくわく理科 3 年」, p86, 平成 23 年, 啓林館.
- 4) 有馬朗人ら：「理科の世界 1 年, 2 年, 3 年」, p34, pp.39-40; p247, p267; p65, p207; 平成 24 年, 大日本図書.
- 5) 坂本祐輔・正元和盛（2012）「ビニール袋を用いた新しい蒸散抑制法」, 熊本生物研究誌, 第 43 号, 5-8.
- 6) 株式会社テストー：製品案内, http://www.testo.jp/products/04/testo885_spec.html (2014.9.19).
- 7) 福島恵美子, 正元和盛（2007）「デンプン検出のたたき染め法と糖の検出法の改良」, 理科の教育, 56 (9), pp.62-65.
- 8) 坂本祐輔・正元和盛（2012）「植物カーテンの効果検証とその教材特性」, 熊本大学教育学部紀要, 第 61 号, 自然科学, 15-22.