

赤外線カメラ, CO₂ センサおよび教具等による 光合成測定 of 教材開発

正元 和盛・竹市 稜子*¹・垂 愛由美*¹・柴田彩緒里*¹

Material Development for Photosynthesis Measurements using Teaching Tools Available at Schools

Kazumori MASAMOTO, Ryoko TAKEICHI*¹, Ayumi TARE*¹, Saori SHIBATA*¹

(Received October 1, 2015)

In elementary and lower secondary schools, students are taught transpiration in plants, but little information regarding its cooling effect is provided. Using radiation thermometers, which are generally used as teaching tools at schools, we could measure decreases in leaf temperature due to this cooling effect. Simultaneously, the temperature decrease was monitored with an infrared camera. Furthermore, using a carbon dioxide sensor, we measured changes in the carbon dioxide concentration due to plant photosynthesis and respiration. Thus, from these findings, students can experimentally measure plant functions efficiently using teaching tools available at schools.

Key words : radiation thermometer, infrared camera, transpiration, photosynthesis, plant functions

1. はじめに

中学校学習指導要領解説理科編¹⁾では、「植物の体のつくりと働きについて総合的な理解をさせる」とあり、また「各種のセンサを用いた計測を行い、通常では計測しにくい量や変化を数値化あるいは視覚化してとらえることや、観測しにくい現象などをシュミレーションすることも可能である。」と示されている。目に見えない事柄を各種センサを用いて視覚化し、定性的定量的に事象をとらえさせ、実感を伴った理解につなげようという意図だと考えられる。「植物の体つくりとはたらき」²⁾では光合成や蒸散について学習するが、蒸散機能の例としては小学校6年で緑のカーテンの例³⁾があげられその教材特性の検証も報告⁴⁾されているが、中学校ではその事に触れていない。表面温度測定機器として小中学校理科において、赤外線サーモグラフィカメラ（赤外線カメラ）の熱画像³⁾が示され放射温度計^{2, 3, 5)}が使われているので、蒸散機能の冷却効果を測定可能だと考える。そこで、小中学校で使われているアジサイなどの葉を使い、個葉差を避けながら1枚の葉で密閉非密閉をつくり、蒸散による冷却を簡便に測定できる事が示された^{4, 6)}。ここでは

それを1/4密閉へ拡張し試み、実験後に光合成産物としてのデンプン検出も可能な事を示した。また、小中学校理科では生物機能の例として呼吸や光合成の二酸化炭素濃度の変化を気体検知管で測定している^{2, 3, 5)}。それを体のつくりと働きとして学習するが、植物の光合成や呼吸を上述の植物素材などを用いて、気体検知管や教材用デジタル気体測定器を使って、どのように簡便に測定できるかCO₂センサでモニターしながら検証した。これらの結果は、陸上草本植物を一貫して用いて、蒸散や光合成の機能を、児童生徒自らの実験で確認する事ができる事を示す。

2. 材料と方法

(1) 葉表面温度の測定

表面温度の測定には、赤外線サーモグラフィカメラ testo 885-2 (テストー, 以下885-2と表記), 赤外線カメラ InfReC ThermoGEAR G100 (日本アビオニクス KK, 以下G100と表記), また教具として使用されている赤外線放射温度計 (AD-5611A (エー・アンド・デイ), 以下放射温度計と表記) も使用した。

屋外で、カラムシ (*Boehmeria nivea* var. *nipponivea*),

*¹熊本大学教育学部卒業生

オシロイバナ (*Mirabilis jalapa* L.), ダイズ (*Glycine max* subsp. *max*)⁷⁾ の葉 1 枚をチャック付きポリ袋で密閉した葉と、無処理葉 (密閉していない葉) の葉温を赤外線カメラ G100 及び放射温度計で測定した。測定日は平成 26 年 10 月 15 日 (天気晴れ), 10 月 24 日 (天気快晴) であった⁸⁾。

チャック付きポリ袋の赤外線透過率を測定した。55℃に設定した恒温器 (IC101W, ヤマト科学) のガラス窓部分に白い紙を貼り, ユニパック E-4 (チャック付きポリ袋, 厚さ 0.04mm, 生産日本社, 以下チャック付きポリ袋と表記) をその紙の上に貼付けた。熱源ガラス窓から 60cm の所から赤外線カメラ 885-2 で撮影し温度を測定した。測定時の気温 (26.8℃), 湿度 (51% RH), チャック付きポリ袋 1 枚による温度減少は, 温源 33.5℃の時約 0.7℃であり, 補正率は 1.02 と見積もられた。

(2) アジサイ葉での葉面密閉した葉の葉温測定とたたき染めによる光合成産物の確認

1) アジサイ葉 1/4 裏表密閉

アジサイ (*Hydrangea macrophylla*) 葉 1 枚の 1/4 ずつを裏または表側を密閉した。ポリ材を 1 枚の葉 1/4 ずつの形にマジックでかたどって切り取り, ボンドをマジックの線の内側にそって塗り, 三角フラスコに水さしにしたままの葉にかぶせ隙間ができないように貼付け密閉した (屋外実験, 図 1- A)。葉温を 11:00, 11:30, 12:00, 14:00, 16:00 に測定した (測定日: 平成 26 年 10 月 6 日)。測定時の温度, 湿度, 照度は 20.7, 21.2, 21.9, 22.8, 22.9 °C, 42, 40, 38, 44, 41% RH, 6.2 より大, 6.2 より大, 6.2 より大, 1.5, 0.7 klx。温湿照度測定には, ミスター省エネ (温湿照度ノード (SW-4210-1204), ベース (SW-4300-1000), セイコーインスツル) を用いた⁶⁾。測定終了 (16:00) 後にたたき染め⁹⁾を行った。

2) 実験室内での蒸散量測定

アジサイ葉 1 枚の裏側の上, 下の 1/4 ずつにボンドでポリ材密閉を行ったアジサイ葉 1 枚を, 三角フラスコにセットし電子天秤 (AS PRO ASP602F, ASONE) にのせ, 3 時間の蒸散量 (5 分毎) を測定した (図 2- A)。27W 蛍光灯 (DL-2714, オーム電機) 2 台とランプ (PRF-150W, ナショナル) で照射した。1 時間照射後, 室内の光を消灯し暗条件 (9 lux) とし, 暗条件 1 時間経過後, 再び照射した。測定時の温湿照度は, 25.3℃, 56% RH, 9.8 klx であった (測定には, おんどりとデジタル照度計を用いた)。葉温を, 0, 30, 60, 120, 180 分に 885-2 で測定した。

気孔開度の指標として, 気孔インデックスを気孔の幅 a , 気孔の長さ b (図 3 上右) での面積とし, 室内

での気孔インデックスを, 暗条件直後と暗条件後の光照射 1 時間後に, スンプ法により葉裏面のレプリカを三ヶ所ずつとった⁶⁾。レプリカを顕微鏡 (BA210, 島津理化) 観察し, 視野の中で焦点を合わせて数値化を行った。

(3) CO₂ 濃度測定の方法と材料

1) 使用機器

気体濃度測定では, 酸素検知管 (31E, ガステック KK), 二酸化炭素検知管 (126KC II, 光明理化学工業 KK), 気体採取器 (ガステック 50, ガステック KK), 教材用デジタル気体測定器 (GOCD-1, ガステック KK) を使用した。GOCD-1 は酸素・二酸化炭素測定器で, 測定方式は二酸化炭素は NDIR 式, 酸素はガルバニ電池式。測定所要時間は 50 秒で, 気体吸引部から測定箇所へ気体を吸引し, CO₂ センサ, O₂ センサを通り測定箇所へ排出するため, 測定箇所の気体濃度を変化させることなく測定が可能である。ミスター省エネ (セイコーインスツル KK) の CO₂ センサノード (SW-3230-1000, 以下 CO₂ ノード:), 温湿照度ノード (SW-3210-1004), ベース (SW-3500-1000) を使用した。ミスター省エネでの測定データはノートパソコンで経時的に集計した。

2) 二酸化炭素低濃度での測定

熊本大学構内に自生しているカラムシを水切りし, 300 mL 三角フラスコにさして, フラスコの口はパラフィルムで巻いて閉じた。ユニパック SL-4 (チャック付ポリ袋, 560 × 400 mm, 厚さ 0.04 mm, 以下 SL-4, 測定時の内部空間体積は約 14 L) の中に, カラムシ, CO₂ センサノード, 温湿照度ノード, GOCD-1 の気体吸引部, 結露防止のために除湿剤, 器材安定用にカゴをいれ, 二酸化炭素濃度が約 0.3 % になるよう呼吸を入れて SL-4 の口を閉じた。温度上昇を防ぐために, 実験器材の入った SL-4 下に発泡スチロールを置き保冷剤を敷いた。また袋外の温度湿度照度を測定するためにもう 1 個温湿照度ノードを置いた。これらをコンテナの上ののせた (図 5)。

測定は 14:20 ~ 15:40 (平成 25 年 11 月 1 日 快晴) に屋外のクスノキの日陰で行った。明条件 1 (約 4 klx), ダンボール箱を使って暗条件 1, 明条件 2 (4 ~ 11 klx) を作った。明条件 2 終了後, 再びダンボール箱をかぶせ暗条件 2 を作り (以下暗条件 2 と表記) 2 時間おいた。開始時, 暗条件直前, 暗条件後, 明条件にして 30 分後に酸素と二酸化炭素濃度の変化を気体検知管, GOCD-1 で測定した。なお気体検知管での酸素濃度の測定は, 開始時と明条件 2 の終了時の 2 回のみ行った。カラムシの葉面積は 280 cm²。

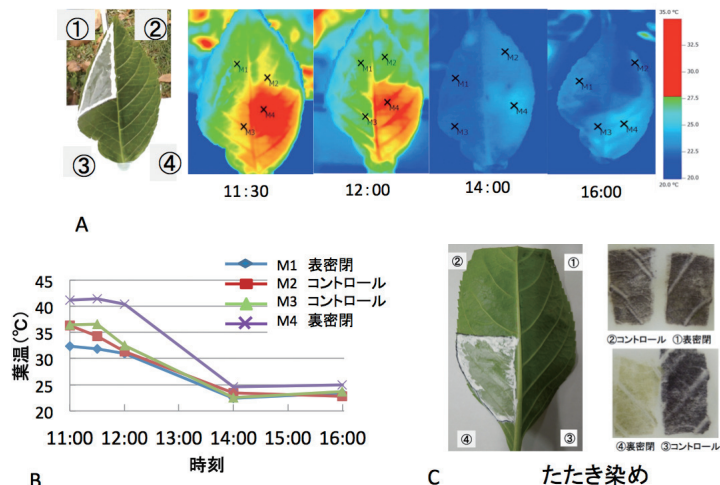


図1 アジサイ葉 1/4 裏表密閉による葉温変化と光合成産物
 Aは赤外線カメラ 885-2 による測定. 温度バーは 25-35℃. Bは各測定時刻での葉温. Cは実験終了後の葉裏側からの写真で, 各部分の葉片を一部切り出して, 光合成によるデンプンをたたき染めにより検出した.

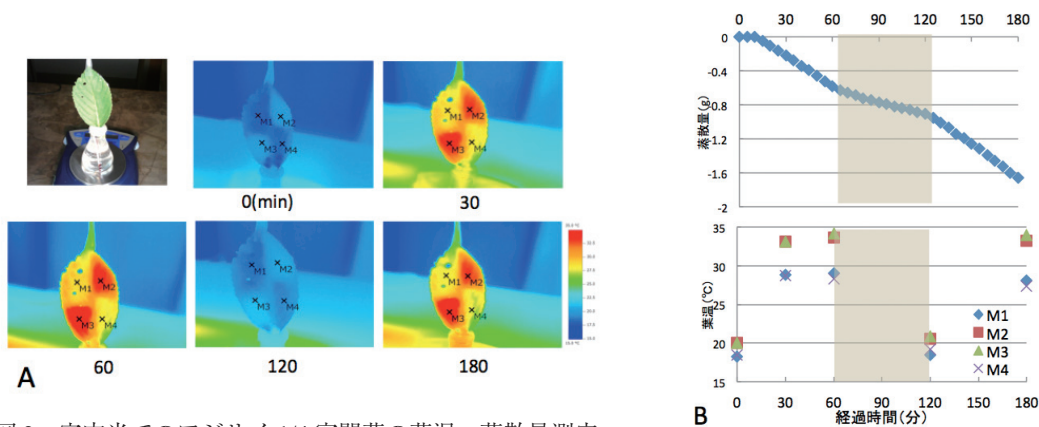


図2 室内光でのアジサイ 1/4 密閉葉の葉温, 蒸散量測定
 A:赤外線カメラ 885-2 による測定. 温度バーは 15-35℃. 条件及び蒸散量測定は, 材料と方法参照. B:蒸散量(上)と葉温(下)の経時変化. マスク部分(60-120分)は光照射を off にして暗条件にした. 0分は光照射直前.

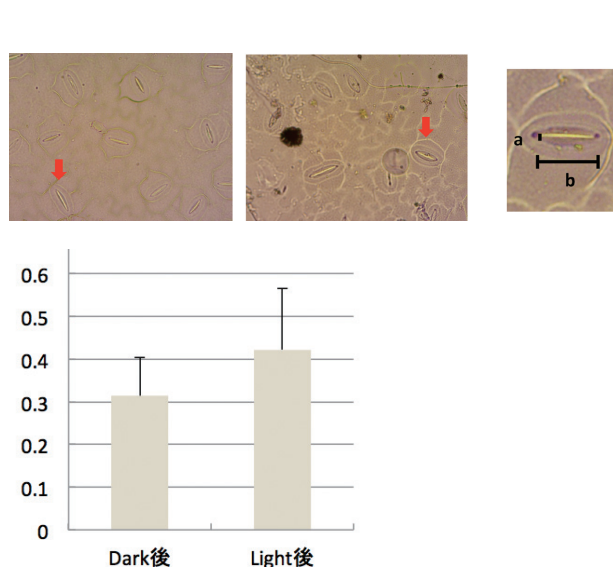


図3 気孔のインデックスの測定
 図2での Dark 後(上左)と Light 後(上中)に葉裏面のレプリカをとり, 顕微鏡観察し, 開き具合を数値化した(下). 上図右気孔のバー b は 18 μm. 詳細は材料と方法を参照.

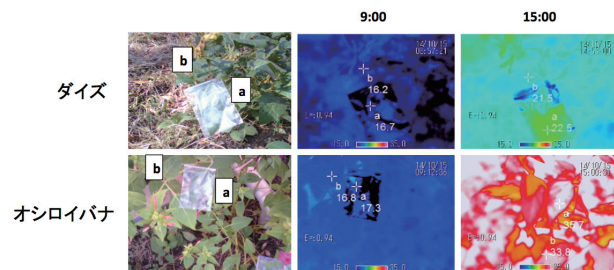


図4 チャック付きポリ袋で葉1枚を密閉したときの葉温測定熱画像(中, 右, 上下段)の温度範囲バーは 15℃~ 35℃.



図5 カラムシでの CO2 濃度変化測定の実験セット
 実験機器の詳細は材料と方法参照.

表 1. ダイズ, オシロイバナでの葉温差 (°C)

9:00 (気温 16.2)			15:00 (気温 23.2)		
葉温		葉温差	葉温		葉温差
密閉あり*1	密閉なし		密閉あり*1	密閉なし	
ダイズ					
16.7	16.2	0.5	22.5	21.5	1.0
オシロイバナ					
17.3	16.8	0.5	35.7	33.8	1.9

* 1: チャック付きポリ袋による減温率を補正していない。

3. 結果と考察

(1) アジサイ 1 枚葉部分密閉での葉温測定とデンプン検出

裏側を密閉したアジサイ葉の 1/4 部分 (M4, ④, 葉右下) では, 裏密閉をした所の葉温が高くなった (図 1-A, B). コントロール部分 (M2; 葉右上, M3; 葉左下) に比べ, 表密閉をした部分 (M1; 葉表左上の 1/4) は温度差がほとんど見られない. しかし, 裏密閉処理を施した所 (M4; 葉表右下の 1/4) の葉温は高くなった (図 1-A; 11:00-12:00). 12:00 のときコントロール部分 (M2, 31.3°C) と, 裏密閉部分との葉温差が一番大きく 9.1°C 差となった (図 1-B). 14:00, 16:00 はクスノキの木陰になったため, また気温が下がって来たため, 1 枚の葉全体として葉温差はわずかであった. 測定終了後, 裏側のポリ材にだけ, 水滴の凝着が見られた (図 1-C). これらの事は, 密閉処理により蒸散が抑制されたことによる葉温の上昇を示している. また, 表側からの蒸散は極めて小さい事を示している.

たたき染めを行うと, 裏密閉 (図 1-C; 葉の裏側から見た写真) 部分の葉片では, ヨウ素デンプン反応が極めて薄かった. 表密閉部は, 無処理コントロール部分のヨウ素染色での濃さと大差なかった (図 1-C 右図の右上). このことは葉表側からの二酸化炭素の供給が小さいことを示唆する. この結果は, カラムシ葉の場合でも同様であった.

(2) アジサイ 1 枚葉部分密閉の室内光での葉温, 蒸散量測定

葉温は, 暗条件後の測定では, スタート時とほぼ同じ値を示した (図 2-A 120 分, B 下図). しかし, それ以外では無処理のコントロール部分 (M1; 葉左上, M4; 葉右下) は約 29.2°C, 裏密閉部分 (M2; 葉右上, M3; 葉左下) は約 34.1°C で, アジサイ一枚葉を 1/4 密閉した葉温では, 裏密閉をした所が, していない所に比べ高くなっていた (図 2-A, B 下図). 裏密閉処理により蒸散が抑制されたことによる葉温の上昇を示

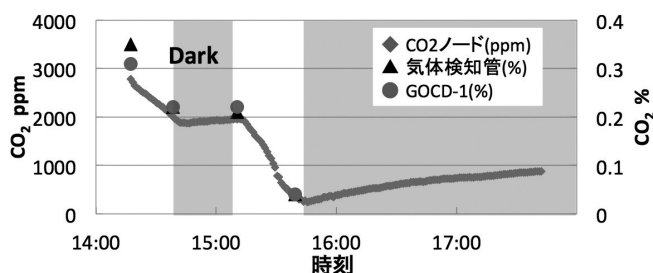


図 6 カラムシ実験セットでの CO₂ 濃度変化測定
実験機器の詳細は材料と方法参照。

表 2. カラムシでの二酸化炭素濃度, 酸素濃度の変化

測定機器	開始時	暗条件 1 直前	暗条件 1 直後	明条件 2 後
気体検知管(▲)CO ₂ %	0.35	0.22	0.21	0.04
気体検知管(▲)O ₂ %	21.0	—	—	21.2
GOCD-1 (●) CO ₂ %	0.31	0.22	0.22	0.04
GOCD-1 (●) O ₂ %	20.7	20.7	20.8	20.8

図 5 の実験での測定. 詳細は材料と方法参照。

している. 光照射を行っているときの方が, 密閉の有無での葉温差が大きく, 暗条件直前で差約 5°C, 暗条件後で差約 1°C と光照射がないと蒸散量に対応して, 密閉非密閉の葉温差が小さくなる. 蒸散量は暗条件下では, 光照射時に比べグラフの傾きが小さくなり, 暗条件下での蒸散速度は明条件の約 45% であった (図 2-B 上). 全蒸散量は -1.7 g で, 蒸散速度は 1.0 g/h (明条件), 0.4 g/h, (暗条件) であった. 実験終了後のポリ材には水滴がみられた.

同一条件での別サンプルを用いて, 暗条件後 (120 分, Dark 後) と測定終了時 (180 分, Light 後) に葉裏面のレプリカをとり, 気孔インデックスを計測した (図 3).

暗条件後は $0.31 \pm 0.09 \mu\text{m}^2$, 測定終了時は $0.42 \pm 0.14 \mu\text{m}^2$ であった (図 3 下). 気孔は焦点深度を変えながら観察したが, Dark 後では Light 後に比べて, やや開度が小さいが (図 3 上), その開き具合の減少は 25% と小さかった (図 3 下). この事は, 図 2B と合わせて, 気孔開度と蒸散速度が比例関係でない事を示唆する.

屋外での蒸散量測定でも, 蒸散速度は明条件 (30 klx) に比べて暗条件の方が小さかった. 葉の裏面レプリカでの気孔インデックスは, 明条件では $0.55 \pm 0.16 \mu\text{m}^2$ であり, 暗条件では $0.34 \pm 0.13 \mu\text{m}^2$ であった.

(3) チャック付きポリ袋密閉での葉温測定

葉面を密閉するのに, ポリ袋を葉の形に切ってバンドを塗り葉に貼付けるのは, 小中学生にとっては, 貼付けがずれたりバンドが手について葉の表にもバンド

がついたりして、作業が困難な事も考えられる。そこで、より簡単に葉面を密閉する方法として、チャック付きポリ袋に葉を入れて葉を覆う方法を検討した。

赤外線カメラ G100 を用いて、ダイズ、オシロイバナの葉をチャック付きポリ袋で密閉し、9:00、15:00 に葉温を測定した (図 4, 表 1)。ダイズ 9:00 は日陰になっていたため、葉温がやや低い (図 4 上段中 9:00 のやや濃い青色)。補正なしでの葉温差は、9:00 でダイズ 0.5°C、オシロイバナ 0.5°C であった。15:00 時点では、ダイズ 1.0°C、オシロイバナ 1.9°C であった (表 1, 図 4)。

このように赤外線カメラでは葉温差を測定できたので、学校教具として使われている放射温度計でも測れる事が知られている^{6, 8)}ので、上記同様にして、ヤブカラシを用いて葉温差の大きくなる 15:00 に測定した。赤外線カメラ G100 による測定で、密閉あり 31.7 (補正後 32.3) °C、密閉なし 29.7°C で葉温差 2.0 (補正後 2.6) °C、放射温度計 AD-5611A による測定で、密閉あり 28.8 (補正後 29.4) °C、密閉なし 27.2°C で葉温差 1.6 (補正後 2.2) °C であった。測定機器での精度に依存して測定温度数値は異なるが、学校教具として使われている放射温度計でも葉温差を測定できる事が更に検証できた。

(4) カラムシによる二酸化炭素濃度変化の測定

直射日光下で、4 枚葉のついた莖を水差しし、全体を袋に入れて CO₂ 濃度変化を測定した (図 5, 図 6, 表 2)。二酸化炭素濃度を 3000 ppm 程度にして実験を行った結果、二酸化炭素濃度の光合成による減少と、わずかに呼吸による増加を確認することができた (図 6)。低濃度になると二酸化炭素の袋からの漏れの影響が少なくなり、呼吸による二酸化炭素濃度の増加も測定できたものと考えられる。箱をかぶせ 30 分間暗条件にした時 (暗条件 1)、CO₂ 濃度の増加はわずかだが、続く光条件 30 分 (明条件 2) で 2000 ppm から 310 ppm へと約 1700 ppm の減少が測定され、見かけの光合成速度は -38 mgCO₂/100cm²/h となった。その変化は気体検知管や教材用デジタル気体測定器 (GOCD-1) でも同様に測定できた (表 2)。暗条件 1 の暗中 30 分での呼吸では 100 ppm 未満の増加であり、低濃度二酸化炭素検知管で測定できる変化量ではなかったため、呼吸による二酸化炭素濃度変化を 30 分で測ることは難しい。それはデジタル気体測定器でも同様に測れなかった (表 2)。しかし約 2 時間暗条件 (暗条件 2) に置くと、気体検知管で測定できる二酸化炭素濃度の十分な上昇 (310 ppm から 870 ppm へ) が見られた。見かけの呼吸速度は暗条件 1、暗条件 2 で 2 および 3 mgCO₂/100cm²/h と計算された。

学校では午前中に機材をセットし、午後に気体検知管で確認する、もしくは機材をセットして翌日に実験すると、気体検知管で呼吸の測定が可能であると考えられる。また酸素濃度に関しては本実験条件下でははっきりとした増減が出なかった (表 2) ため、測定は困難であると考えられる。

二酸化炭素濃度の変化から、気体検知管での測定は、明条件時の植物機能による二酸化炭素減少を二酸化炭素検知管でとらえることは可能であるが、暗条件に関しては二酸化炭素の上昇が CO₂ ノードではグラフ上認められても、気体検知管では読む人での誤差の範囲に含まれてしまうため、困難であると考えられる。用いる植物の葉の枚数を増やせば呼吸量も上がるかもしれないが、そのためにはもうひと回り大きいサイズの袋が必要となる。

4. まとめ

小中学校では植物機能の蒸散について学習するが、その冷却機能についてはほとんど触れていない。学校教具として使われている放射温度計を用いて、蒸散による冷却によって葉温が低下するのを測定できる事を、赤外線カメラで検証しながら示した。また同様に、植物による二酸化炭素濃度の変化も学校教具により測定できる事を、CO₂ センサで検証しながら示した。これらの事は、児童生徒が自らの実験によって、植物機能の測定ができる事を示している。

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:「中学校学習指導要領解説 理科編」, p.14, p.65, p.111, 平成 20 年 9 月, 大日本図書
- 2) 有馬朗人ら:「理科の世界 1 年, 2 年, 3 年」, pp.30-49; p.247, p.267; p.65, p.207; 平成 24 年, 大日本図書.
- 3) 有馬朗人ほか:「新版たのしい理科 3 年; 4 年; 6 年」, p.85, p.93; p.117; pp.58-65, pp.19-27, pp.38-40, 平成 27 年, 大日本図書
- 4) 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.

- 5) 石浦章一, 蒲田正裕ほか 54 名:「わくわく理科 3 ; 6」, p.102 ; pp.15-20, pp.28-31, pp.49-58, 平成 27 年, 啓林館.
- 6) 正元和盛・柴田彩緒里・小宮良基・坂本祐輔:「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」, 熊本大学教育学部紀要, 第 63 号, pp.369-374, 2014.
- 7) 米倉浩司, 梶田忠:「植物和名一学名インデックス YList」 http://ylist.info/ylist_simple_search.html, (2015.10.1)
- 8) 竹盛瑤子・正元和盛 (2014):「葉面密閉での葉温測定の試み」, 熊本生物研究誌, 第 45 号, pp.20-23.
- 9) 福島恵美子, 正元和盛 (2007):「デンプン検出のたつき染め法と糖の検出法の改良」, 理科の教育, 56 (9), pp.62-65.