

植物の呼吸を実感を伴って理解させる実験教材としてのブロッコリーの利用

Teaching materials for respiration of plants with realistic understanding

森島 康雄¹・古屋 康則²

Yasuo Morishima and Yasunori Koya

¹〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学大学院 教育学研究科

²〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学教育学部 理科教育

TEL: 058-293-2255 (Email: koya@gifu-u.ac.jp)

要 約

植物が呼吸を行っていることを示す実験に用いる呼吸量の多い植物教材としてブロッコリーが適していることを示した。ブロッコリーをビニール袋に封入して暗黒下に置いた場合の呼吸による袋内の酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化量は、植物体1 gあたりに換算しても比較として用いたコマツナとホウレンソウを大きく上回った。市販のブロッコリー1塊(約300 g)を用いれば、20分間の暗黒下処理でも十分な酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化が検出できることが示された。1授業時間内で完結する実験により、植物が呼吸によって酸素を消費し二酸化炭素を放出することを明確に示せれば、より実感を伴う理解を促すことにつながると考えられる。

1. はじめに

中学校学習指導要領解説理科編において、第2分野の「植物の生活と種類」のなかの「葉・茎・根のつくりと働き」について、「観察によって、種子植物の葉、茎、根の基本的なつくりの特徴を見いだすとともに、それらを光合成、呼吸、蒸散についての実験結果と関連付けてとらえさせ、植物の体のつくりと働きについて総合的に理解させることがねらいである。」とされている(文部科学省, 2008)。植物が光合成だけでなく呼吸をしていることを明確に示す実験については、いくつかの例が複数の教科書に示されている。その例としては、植物体をビニール袋に封じ込めて暗黒下に一定時間おいた後に、ビニール袋内で増加した二酸化炭素を石灰水を用いて検出する方法や、同様の処理後にビニール袋内の空気中の酸素濃度と二酸化炭素濃度を気体検知管を用いて測定する方法などがある。また、試験管内に水とともに水性植物(オオカナダモなど)を入れてゴム栓をし、アルミニウム箔などで遮光して数時間おき、水中に溶け出し

た二酸化炭素による酸性化をpH試薬などで検出する方法も間接的な方法として掲載されている。

これらの実験を実施する際に、「実感を伴った理解」という点に主眼を置くと、いくつかの問題点が浮かび上がる。まず、いずれの実験においても二酸化炭素が実験前に比べて顕著に増加し、酸素が顕著に減少するまでに、少なくとも数時間を要する点である。通常の理科の授業時間内で実験の仕込みから計測等までを実施することは不可能であり、おそらくは教師が授業の数時間前に実験を仕込むことになる。したがって、生徒はあらかじめ準備された各実験群について二酸化炭素の有無を調べたり、気体の濃度を測定するだけになってしまい、「何が気体の濃度を変化させたのか」という原因について実感を伴った考察を進めるのは困難であろう。植物が「呼吸」を行っていることをより明確に理解させるには、二酸化炭素の増加のみを検出するだけでは不十分であり、酸素の減少についても実験により証明すべきである。そのためには気体検知管による測定が最も簡便である。一方で、

気体検知管による測定には誤差がつきものであり、生徒による測定で二酸化炭素の増加や酸素の減少を明確に捉えるには、植物体に十分呼吸をさせた上で測定する必要がある。授業実施日に授業の2、3時間前に実験を仕込んだのでは、気体の濃度変化は少なく、実感を伴った理解に結びつけることは困難である。これを解決するには、呼吸量が多い植物材料を用い、可能であれば授業時間内で実験の全行程を実施することが望ましい。一般に流通している野菜類の中で呼吸量が多い部分として、若い芽、幼茎、花蕾、未熟種子、伸び盛りの葉などが挙げられている(宮崎, 2001)。そこで本研究では、呼吸量の高い植物教材を検討し、気体検知管を用いた実験で短時間でも十分な気体濃度の変化を検出できるようにすることを第1の目的とした。また、気体検知管を用いてビニール袋内の気体を調べる際には、検知管を袋に差し込む必要があるが、差し込み口に何かしらの工夫がなされていないと袋内部の空気と外部の空気が容易に混合してしまい、測定結果にも誤差が生じやすと考えられる。教科書等では差し込み口に関する工夫は明記されていない。そこで本研究では、気体検知管の差し込み口に若干の工夫を施すことで、袋内と外の空気の混合を防ぎ、測定誤差の少ない結果が得られるようにすることを第2の目的とした。

2. 材料と方法

植物材料 教材植物として、コマツナ、ホウレンソウ、ブロッコリーの3種の野菜を用いた(図1)。コマツナは教科書で教材として取り上げられていることから用いた(岡村ほか, 2011)。ホウレンソウはコマツナと同じく葉物野菜であるが、伸び盛りの葉として呼吸量が比較的多いとされていることから(宮崎, 2001)用いた。ブロッコリーについては、収穫後の呼吸量が多いことが知られていることから(波部・土井, 2011)用いた。いずれの材料も実験当日の午前10時にスーパーマーケットで、できるだけ新鮮なものを購入した。購入後、実験に用いるまでの間、材料の植物はバケツに入れた水の中に切り口を入れて、十分に水を吸わせた(図1)。



図1. 実験に用いたコマツナ・ホウレンソウ・ブロッコリー。使用する直前まで水に浸けておいた。

実験方法 すべての実験は岐阜県輪之内町立二木小学校の理科室にて、2015年6月20日から7月28日までの間に行った。実験時の室温は外気温とほぼ同じであり、24℃から31℃であった。植物材料の重量を測定後、植物をチャック付きのA4サイズのビニール袋(ユニパック: 280mm×200mm; 容量約2600ml; 図2a)に入れ、袋内に空気を十分にに入れてからチャックを閉じた。袋を閉じる直前に気体検知管(ガステック: 二酸化炭素用: 型式/2EH: 濃度/0.5–8%・二酸化炭素用: 型式/2EL: 濃度/0.03–1%・酸素用: 型式/31E: 濃度6–24%; 気体採取器セットGV-50PS)にて二酸化炭素濃度と酸素濃度を測定した。その後、暗室内に一定時間(12時間および20分間)放置した後、再び二酸化炭素濃度と酸素濃度を測定した。測定時間はすべて1分間とした。すべての実験とも5回繰り返して行った。数値のデータは平均値±標準誤差で示した。

気体検知管挿入口への工夫 気体検知管をビニール袋に挿入する際に、外気が混入したり、袋内部の空気が外に漏れないようにするために、ビニール袋には以下のような工夫を施した。まず、挿入部位となる部分を決め、この部分を丈夫にするために、袋の表と裏にそれぞれ粘着テープを貼った。次に、穴あけパンチで挿入部に穴を開けた(図2b)。最後に、穴の外側にセロハンテープを貼って穴を塞いだ(図2c)。気体の濃度を測定する際には、セロハンテープを剥がして素早く気体検知管を穴に挿入した(図2d)。穴のサイズは気体検知管とほぼ同じかやや小さいため、気体検知管挿入時には袋の内部の空気と外気が混ざることが極力防げると考えた。

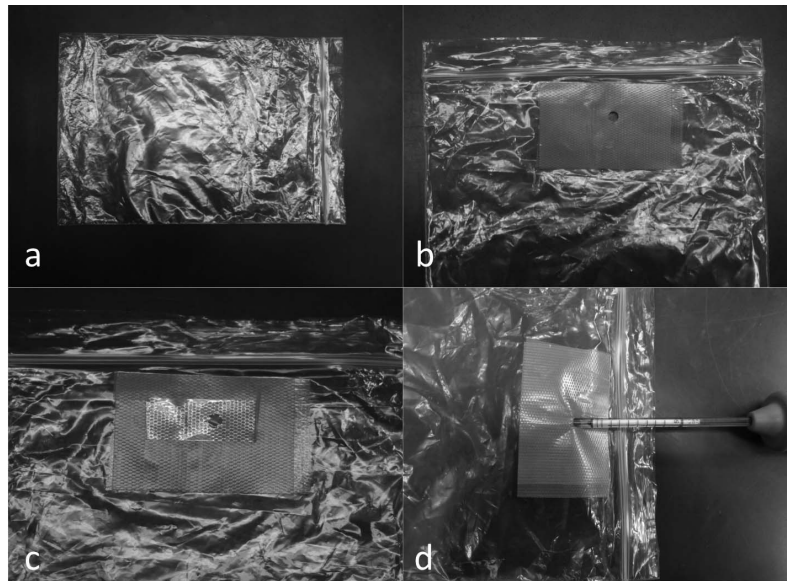


図2. ビニール袋に施した気体検知管挿入口の加工. (a) 実験に使用したチャック付きビニール袋. (b) 袋の内外に粘着テープを貼り、粘着テープを貼った部分に穴あけパンチで穴を開ける. (c) セロハンテープで塞ぐ. (d) セロハンテープを剥がし、気体検知管を挿入する.

3. 結果

(1) 12時間暗黒下に置いた実験

2015年6月20日に実施した。当日の天候は曇のち晴れ、開始時の室温は27℃であった。植物材料を正午にビニール袋に入れ、深夜0時までの12時間、暗室に置いた。実験開始時の酸素濃度と二酸化炭素濃度はそれぞれすべての袋で21.0%および0.04%であった。

実験に使用した植物の重量は、コマツナが214±1.0g、ホウレンソウが192±4.6g、ブロッコリーが378±15.5gであった。実験終了時の酸素濃度および二酸化炭素濃度を図3に示した。酸素濃度はコマツナで15.2±0.37%、ホウレンソウで11.9±0.95%となったが、ブロッコリーでは5検体とも測定下限の6%を示し、正確な濃度を測定できなかった(図3a)。二酸化炭素濃度はコマツナで3.70±0.37%、ホウレンソウで5.46±0.50%となったが、ブロッコリーでは5検体とも測定上限の8%となり、正確な濃度を測定できなかった(図3b)。

市販のブロッコリー1塊を用いると呼吸量が正確に測定できなかったため、1塊を1/3程度に分割して再度同様の実験を行った。実験は2015年6月27日正午に開始し、深夜0時に終了した。当日の天候は曇、開始時の室温は25℃であった。ブロッコリーを3分割した。各塊の重

量は125±1.6gとなった。実験開始時の酸素濃度と二酸化炭素濃度はそれぞれすべての袋で20.5%および0.04%であった。実験終了時の酸素濃度は12.8±0.27% (図4a)、二酸化炭素濃度は6.2±0.17% (図4b)となった。

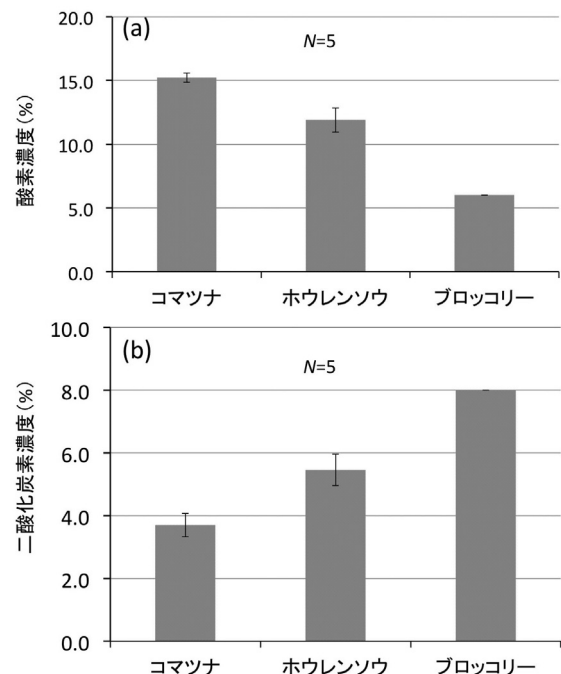


図3. コマツナ・ホウレンソウ・ブロッコリーをビニール袋に入れて12時間暗黒下においた後の袋内の空気の酸素濃度 (a), および二酸化炭素濃度 (b). ブロッコリーでは酸素濃度が測定下限 (6%), 二酸化炭素濃度が測定上限 (8%) となった. エラーバーは標準誤差を示す.

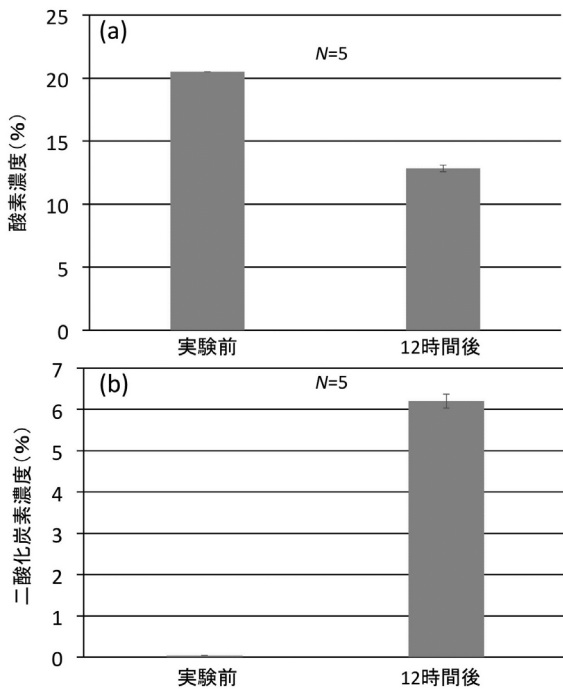


図4. ブロッコリーを三分割したものをビニール袋に入れて暗黒下に置いた際の、実験前および12時間後の袋内の空気の酸素濃度 (a), および二酸化炭素濃度 (b). エラーバーは標準誤差を示す.

コマツナ, ホウレンソウ, ブロッコリーの呼吸量を比較するために, 酸素濃度および二酸化炭素量の変化量 (濃度) を植物体 1gあたりに換算した (図5). 植物体 1gあたりの酸素濃度の変化量は, コマツナで $0.027 \pm 0.0017\%$, ホウレンソウで $0.047 \pm 0.0044\%$, ブロッコリーで

$0.061 \pm 0.0021\%$ となった. 植物体 1gあたりの二酸化炭素濃度の変化量はコマツナで $0.017 \pm 0.0019\%$, ホウレンソウで $0.028 \pm 0.002\%$, ブロッコリーで $0.049 \pm 0.0014\%$ となった. 酸素濃度と二酸化炭素濃度いずれにおいても, 植物体 1gあたりの変化量はブロッコリーで最も大きく, 酸素濃度ではコマツナの約2.2倍, 二酸化炭素濃度ではコマツナの約2.9倍を示した.

(2) 20分間暗黒下に置いた実験

2015年7月28日に実施した. 当日の天候は晴れ, 開始時の室温は 31°C であった. ブロッコリー1塊を午前11時17分にビニール袋に入れ, 11時37分までの20分間, 暗室に置いた. ブロッコリー1塊の重量は $309 \pm 11.4\text{g}$ であった. 実験前後の酸素濃度および二酸化炭素濃度を図6に示した. 酸素濃度は実験開始時には5検体すべてで20.7%であり, 終了時には $18.84 \pm 0.25\%$ (最大19.4%; 最小17.9%) となった (図6a). 二酸化炭素濃度は実験開始時には5検体すべてで0.05%であり, 終了時には $1.06 \pm 0.075\%$ (最大1.2%; 最小0.8%) となった (図6a).

4. 考察

本研究では, 呼吸量の多い植物教材を検討することを目的として, まず東京書籍の中学校理科教科書 (新しい科学; 岡村ほか, 2011) で教

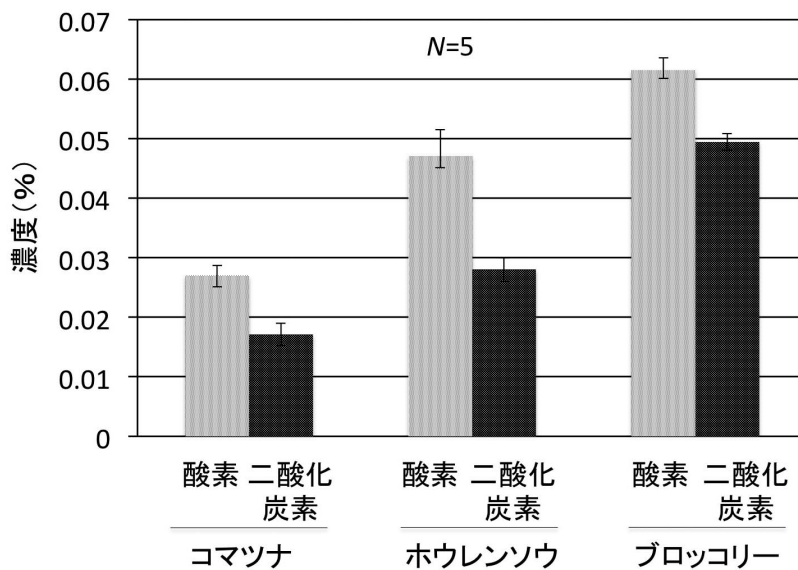


図5. コマツナ・ホウレンソウ・ブロッコリーをビニール袋に入れて暗黒下においた際の, 実験前と12時間後の袋内の空気中の酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化量の比較. 変化量は植物体 1gあたりに換算した. エラーバーは標準誤差を示す.

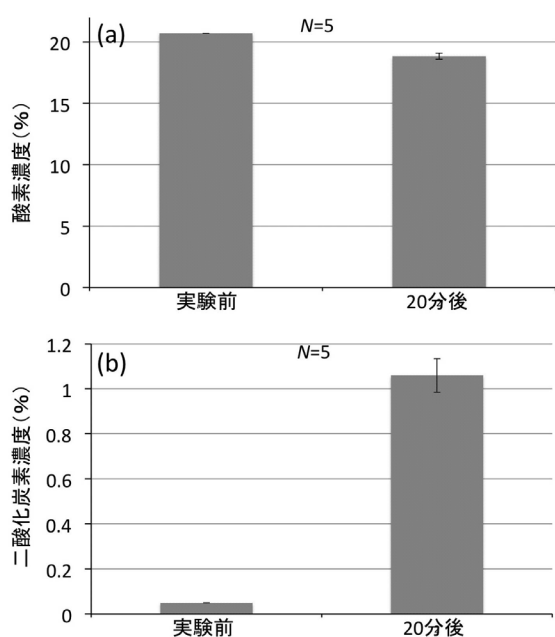


図6. ブロッコリーをビニール袋に入れて暗黒下に置いた際の、実験前および20分後の袋内の空気酸素濃度 (a), および二酸化炭素濃度 (b). エラーバーは標準誤差を示す.

材として用いられているコマツナ, コマツナと同じ葉物野菜としてホウレンソウ, そして一般的に呼吸量が多いとされる花蕾 (波部・土井, 2011) から構成されているブロッコリーの3種の野菜を材料として, 酸素消費量と二酸化炭素放出量を比較した。用いた材料はそれぞれ重量が異なるため, 呼吸量を比較するために1gあたりの酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化量で比較したところ, ブロッコリーの変化量が最も大きいことがわかった。用いたビニール袋の容積にもよるが, 今回用いた容積の袋では, ブロッコリーを用いた際の気体の濃度の変化量はコマツナの変化量の2倍以上であった。また, 同じ葉物野菜でもコマツナとホウレンソウを比較すると, 伸び盛りの葉であるホウレンソウの方が気体の濃度変化量が大きいことが示された。

今回用いた3種の野菜は何れも比較的低価格であり, 1年を通じて流通していることから, 入手の容易さについて差はないと考えられる。従って, 生徒に植物が呼吸を行っていることを明確に示す実験を行う際には, 呼吸量の大きいブロッコリーが適していると言える。一般的に植物が呼吸することを示す教材としてはモヤシ

やダイズ・キヌサヤが用いられるが (井口・山本, 2012), これらは植物の通常の形態とは大きく異なっており, 生徒に普通の植物が呼吸をしているという理解は得られにくいかもしれない。ブロッコリーは葉物野菜とは異なり, 葉が少なく, 大部分が花蕾ではあるが, 通常の植物体との違いは少なく, ブロッコリーによる呼吸が「植物による呼吸」と認識されやすいのではないかと考えられる。この点については, 授業実践によって生徒の反応を確認する必要がある。

植物が呼吸を行っていることを「実感を伴って」理解させるためには, 1回の授業時間内 (50分) で実験を完結させることが有効であると考えられる。東京書籍の中学校理科教科書 (岡村ほか, 2011) では, コマツナを用いた実験で2, 3時間暗いところに置いた後に気体検知管を使って酸素濃度と二酸化炭素濃度を測定する実験方法を掲載している。この方法では, 授業の前にコマツナを袋に入れて暗いところに置く必要があり, 多くの場合, このような処理は教師によって生徒不在のまま行われることが予想される。生徒が実験として行うことは, 教師が仕込んだコマツナの入った袋について, 単に酸素と二酸化炭素の濃度を測定するのみになってしまう。これではたとえ酸素濃度が低下し, 二酸化炭素濃度が上昇していたとしても, その理由が暗黒下に置かれたコマツナの呼吸によるものであるということを実感を伴って理解できるのか, 疑問である。さらに, 教科書に例示されている気体濃度の変化を見ると, 酸素濃度で0.5%, 二酸化炭素で0.82%となっている (岡村ほか, 2011)。この程度の変化量では, 気体検知管による測定操作の際の不手際 (外気の混入など) や測定誤差を考えると, すべての生徒が植物の呼吸による酸素消費と二酸化炭素放出を明瞭な数値として捉えられるのか, 不安が残る。

以上の観点から本研究では, コマツナよりも呼吸量の多いブロッコリーを用いて, 授業時間内で完結する実験を想定し, 暗黒下におく時間を20分として酸素濃度と二酸化炭素濃度を測定した。その結果, 酸素濃度の変化量は平均で1.86% (最大2.8%, 最小1.3%), 二酸化炭素濃度の変化量は平均で1.01% (最大1.15%, 最小0.75%)

となった。教科書に掲載されている例と比較すると、酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化量はともに、短時間での暗黒処理にもかかわらず著しく大きいものとなった。今回得られた結果は、ブロッコリーを教材として用いることで、植物が呼吸によって酸素を消費し二酸化炭素を放出していることに関して、実感を伴って理解させられる実験を1回の授業時間内で実施・完結させることが可能なことを示している。

短時間の暗黒処理では、呼吸による酸素濃度や二酸化炭素濃度の変化量は小さいため、袋内の空気に外気が混入することは最小限にとどめる必要がある。そこで本研究では、気体検知管の太さよりもやや小さい穴あけパンチで事前に穴を開けておき、それをセロハンテープで塞ぐことで、穴の開閉を容易にし、また、袋の再利用を可能にした。さらに、穴あけ部分をあらかじめ粘着テープで補強することで、気体検知管の挿入操作やセロハンテープによる穴の開閉などの取り扱いを容易にした。今回の実験で得られたデータの誤差は、用いた植物の重量に変異があるにもかかわらず、比較的小さく抑えられたことは、気体検知管挿入口に施した工夫が袋内部への外気の混入を極力防げたことを示唆しており、工夫が有効であったものと判断した。

本研究では、植物が呼吸をしていることを実感を伴って理解させるための植物教材として、呼吸量の多いブロッコリーが適していることを示した。また、気体検知管を用いた酸素濃度と二酸化炭素濃度の測定の際の誤差をできるだけ少なくするために、検知管挿入口に工夫を施した。これらの方法を用いることで、1授業時間内での実験が可能であることを提示した。今後は生徒による実験で、酸素濃度と二酸化炭素濃度にどれほどの変化量が見られるのか、また、実験を通じて植物の呼吸についての実感を伴った理解が得られるか否かについて、授業実践を通じた検討が必須である。平山ほか(2014)は、データロガーを用いてリアルタイムで気体の濃度を測定・表示することで、1回の授業時間内に植物の光合成の実験を行う方法について述べている。ブロッコリーを用いた呼吸の実験に平山ほか(2014)のデータロガーを用いた実験を

応用することは、実感を伴う理解を得る上でさらに有効な方法になるかもしれない。

引用文献

- 平山大輔・森川英美・後藤太一郎. 2014. 光合成の授業におけるICTの活用とその有効性—小学校理科6年小単元「生物と空気のかかわり」に注目して—, 理科教育学研究, 54: 419-426.
- 井口智文・山本千帆. 2012. 呼吸・光合成量測定のための簡易装置の開発. 宇都宮大学教育学部紀要, 62: 15-21.
- 宮崎丈史. 2001. 予冷のための基礎知識. 農業経営者, No. 66 (2001年7月号): 8-11.
- 文部科学省. 2008. 中学校学習指導要領解説理科編. 大日本図書, 149p.
- 波部一平・土井香織. 2011. MA包装貯蔵を主体としたブロッコリーの鮮度保持. 長崎農林技術センター研究報告, No. 2: 97-118.
- 岡村定矩ほか49名. 2011. 新しい科学 1年. 東京書籍, 240p.