

植物ホルモンであるエチレンの教材開発 —リンゴから発生するエチレンの定量及び 根の成長に及ぼすエチレンの影響—

加藤 良一

地域教育文化学部 児童教育コース

長世美由希

地域教育文化学部 食環境デザインコース

長根 智洋

北海道教育大学 教育学部 釧路校

(令和2年4月21日受理)

要 旨

トウモロコシの種子を流水中で吸水させた後、ペーパータオル上に播種した。発根した種子の中から、主根が真っ直ぐに3～5mm伸びたものを選んだ。ガラスシャーレに、ペーパータオルを2枚敷いて、水で湿らせた。そのペーパータオル上に選んだ種子を10個並べた。何も入っていない3ℓの密封容器(対照区)、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って23℃下で48時間事前に入れておいた同容器にこのガラスシャーレをそれぞれ入れ、容器に蓋をして23℃下で24時間置いた。その結果、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm(対照区)、10ppm、又は20ppmになった。このとき、トウモロコシの主根の成長はエチレンの作用で阻害され、エチレンの濃度が高いほどその阻害率が高くなった。これを、高等学校の「生物」におけるエチレンの新たな実験教材として提唱できた。なお、エチレンの定量には、検知管式エチレン測定器を用いた。

I はじめに

エチレンは気体の植物ホルモンであり、成熟した果実、落葉、花の老化、又は傷害などでその生成が促進され、葉柄の上偏成長、茎の成長、根の成長、花芽形成、性の決定、種子の休眠打破、落葉・落果、及び果実の成熟促進など、植物のさまざまな生理作用に関わっている^{1) 2) 3)}。

高等学校の「生物」では「植物の環境応答」の中でエチレンが取り上げられ、密封容器に成熟したリンゴと青いバナナを入れた実験より成熟したリンゴから放出されるエチレンが未成熟のバナナを成熟させて黄色に変える例^{4) 5) 6)}、密封容器に成熟したリンゴと未成熟のリンゴを入れた実験より成熟したリンゴから放出されるエチレンが未成熟のリンゴを成熟させる例⁷⁾、及び密封容器に成熟したリンゴと葉のついたツバキの枝を入れた実験より成熟したリンゴから放出されるエチレンが落葉させる例⁸⁾が教科書に記載されている。

本研究では、成熟したリンゴから発生するエチレン量を数値化して、根の成長に及ぼすエチレンの影響を明確に示すことができる新たな実験教材を開発した。

II 研究方法

1. 試料の入手及び準備

リンゴ（品種：ふじ、ふじ早生、サンふじ、千秋、秋映、陽光、清明、シナノスイート、シナノゴールド、及びジョナゴールド）及びバナナ（エクアドル産及びフィリピン産）は、山形市内のスーパーマーケットで購入した。これらは、入っていた袋から出して、 23 ± 1 ℃下に約24時間置いた後、実験に用いた。

2. エチレン濃度の測定

検知管式エチレン測定器を用いて測定した。気体採取器セット（㈱ガステック、Model: CV-100S）に気体検知管（㈱ガステック、エチレン用、No.172L）1本を取り付けて（図1）、1回で100mlの気体を約2分間で吸引し、気体検知管中の青色に変化した（図2）箇所の数値を記録した。広口透明容器（東京硝子器械㈱ 商品コード：715-22-54-08、材質：塩化ビニール、容量：3ℓ、口径：114mm、胴径：135mm、及び高さ：260mm）の蓋に穴（直径：5.56mm）を開け、蓋の外側からその穴をガムテープで（図3）ふさいだ。この容器にリンゴ、バナナ、又は発根したトウモロコシ種子を入れて蓋をし、 23 ± 1 ℃下に一定時間放置した後、蓋は取らずに蓋に付いたガムテープをはがして、その穴に気体検知管を根元まで入れながらエチレン濃度を測定した（図4）。実験に用いたリンゴは、広口透明容器に入れる前に、秤（㈱タニタ、東京、Model: KF-200）を用いてその生重量を1個ごと測り、リンゴ1kg当たりの発生したエチレン量をppmで算出した。



図1 気体検知管を取り付けた気体採取器セット

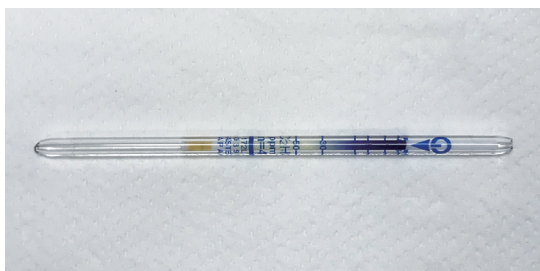


図2 中が青色に変化した気体検知管

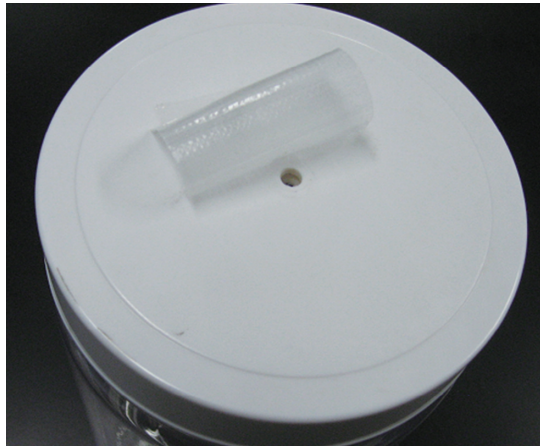


図3 広口透明容器の蓋に開けた穴とガムテープ



図4 検知管式エチレン測定器を用いてエチレン濃度を測定している様子

3. エチレン発生量に及ぼす温度の影響

3つの広口透明容器にリンゴ（品種：ふじ）を1個ずつ入れ蓋をして、 17 ± 1 ℃、 23 ± 1 ℃、又は 30 ± 1 ℃下に置いた。1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、及び48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

4. エチレン発生量に及ぼすリンゴを切った影響

4つの広口透明容器を準備し、そこにリンゴ（品種：サンふじ）をそのまま（対照区）1個入れ、そこに1個のリンゴを縦に2つに（1/2に）切って入れ、そこに1個のリンゴを縦に4つに（1/4に）切って入れ、又はそこに1個のリンゴを縦に8つに（1/8に）切って入れ、それぞれ蓋をして、それらを 23 ± 1 ℃下に置いた。1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、及び48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

5. リンゴの品種ごとのエチレン発生量

ふじ、ふじ早生、サンふじ、千秋、秋映、陽光、清明、シナノスイート、シナノゴールド、又はジョナゴールドの品種のリンゴを切らないで広口透明容器に1個ずつ入れ蓋をして、 23 ± 1 ℃下に置いた。24時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。また、ふじ早生、サンふじ、陽光、清明、シナノスイート、シナノゴールド、又はジョナゴールドの1個のリンゴをそれぞれ縦に4つに（1/4に）切って同容器に入れ蓋をして、 23 ± 1 ℃下に置いた。24時間後に、同様にその容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

6. エチレン発生量に及ぼすACCの影響

リンゴ（品種：秋映）2個のへたをペンチでそれぞれ切り取り（図5）、その窪みの箇所の皮をメスでむいた（図6）。また、対照区として、へたを切らずに窪みの皮もむかないリンゴも1個用意した。それらのリンゴを1個ずつ3つの広口透明容器に入れた後、窪みの皮をむいた箇所にピペットを用いて蒸留水1ml又は1mM アミノシクロプロパンカルボン酸（ACC）を1ml入れた（図7）。そして、それらの容器に蓋をして、 23 ± 1 ℃下に置いた。48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、これら3つの容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

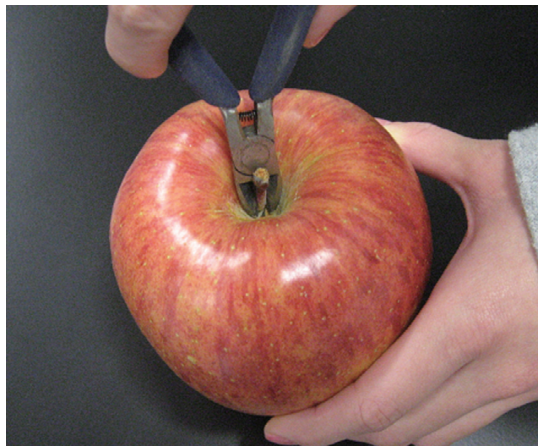


図5 リンゴのへたをペンチで切り取っている様子



図6 リンゴの窪みの箇所の皮をメスでむいている様子



図7 リンゴの窪みの皮をむいた箇所に
ピペットを用いてACCを入れている様子

7. バナナの成熟に及ぼすエチレンの影響

リンゴ（品種：ふじ早生）1個を縦に4つに（1/4に）切って広口透明容器入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に24時間事前に置いておいた。また、別の同容器に同じ品種のリンゴを切らずに1個入れた。対照区として、リンゴを入れてない同容器も用意した。次に、未成熟のバナナ（エクアドル産）の中から青色の濃さが同じ3本を選んで（図8）、それら3つの容器にそれぞれ1本ずつ入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に48時間置いた（図9）。この48時間置いた後に、検知管式エチレン測定器を用いて、容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。さらに、バナナが熟して青色から黄色に変わった色の違いも確認した。別の実験で

は、成熟したバナナ（フィリピン産）の中から黄色の濃さが同じ3本を選んで（図10）、同様の3つの容器に（この時のリンゴの品種：シナノスイート）それぞれ1本ずつ入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に48時間置いた。この48時間置いた後に、容器内のエチレン濃度を同様にそれぞれ測定し、バナナがさらに熟して黒い斑点が現れる頻度を確認した。

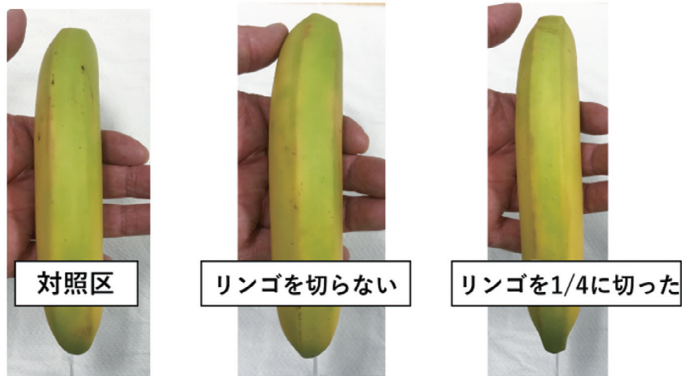


図8 実験に用いた未成熟の青色のバナナ



図9 広口透明容器にリンゴと未成熟の青いバナナが入られている様子

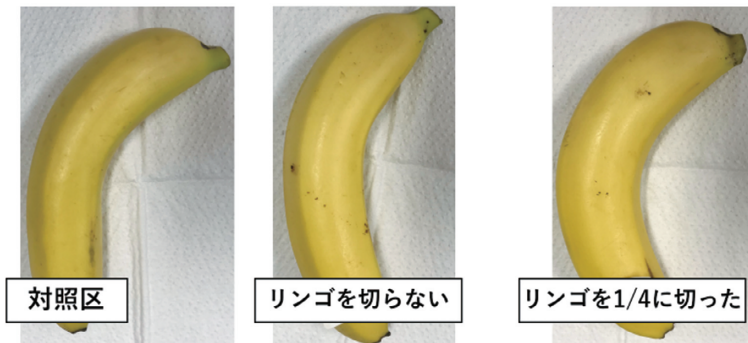


図10 実験に用いた成熟した黄色のバナナ

8. 根の成長に及ぼすエチレンの影響

乾燥したトウモロコシ（品種：ゴールデンクロスバンタム70）の種子27gを、ネットに入れて水道の流水に約42時間さらして吸水させた（図11）。コンテナ（縦：190mm、横：285mm、高さ：50mm）の底にペーパータオル（ライオン㈱、東京、商品名：リードヘルシークッキングペーパー）を1枚敷き、そこに水道水を70ml入れ、吸水したトウモロコシの種子を均等に散らばるように蒔いた（図12）。そのコンテナを黒いビニール袋に入れて、 23 ± 1 ℃下に約30時間置いた。



図11 トウモロコシの種子をネットに入れて水道の流水にさらして吸水させている様子



図12 濡れたペーパータオル上に吸水したトウモロコシの種子を蒔いた様子

小さなガラスシャーレの蓋（直径：65mm、高さ：16mm）に、丸く切った同じペーパータオルを2重に敷いて、その外周に1～10の数字をマジックインキで書き込んだ（図13）。このガラスシャーレの蓋を3つ用意し、3つの広口透明容器に1個ずつ入れた。その内1個の同容器には、リンゴ（品種：サンふじ）1個を縦に4つに（1/4に）切って入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に48時間事前に置いておいた（図14）。

3つの広口透明容器内に入っているガラスシャーレの蓋に、ピペットを用いて蒸留水を6.4mlそれぞれ入れた。上記のコンテナの中から、主根が真っ直ぐに3～5mm伸びた種子（図15）を30個選び出し、各主根の長さを電子式ノギス（株）ミットヨ、神奈川県川崎市、Model：500-301）を用いて正確に測りその数値をメモして、ガラスシャーレのペーパータオルに書かれている数字の上に1個ずつ置いた。この時、主根がガラスシャーレの真ん中に向かってそれぞれ伸びるように、各種子を並べた。次に、別の広口透明容器に同じ品種のリンゴを切らずに1個入れた。対照区としては、残りの1つの同容器にはリンゴを入れなかった。

これら3つの広口透明容器に蓋をして、 23 ± 1 ℃下に24時間置いた（図16）。この24時間置いた後に、検知管式エチレン測定器を用いて、容器内のエチレン濃度を測定した。次に、ガラスシャーレ内の種子の主根（図17）の長さを同じ電子式ノギスを用いて正確に測り、その数値をメモした。そして、主根ごとに24時間当たりで伸びた長さを計算し、その平均値と標準誤差を算出した。

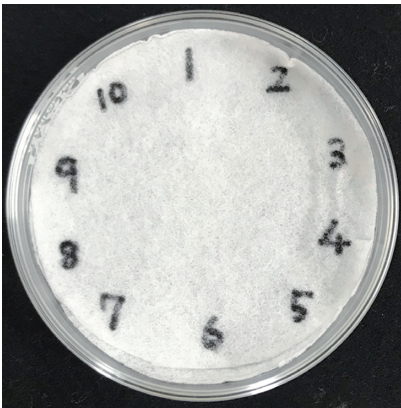


図13 ガラスシャーレの蓋にペーパータオルを2重に敷いて数字を書き込んだ様子



図14 広口透明容器に図13のシャーレと1/4に切ったリンゴを入れ、48時間事前に置いておいた様子



図15 主根が真っ直ぐに3～5mm伸びたトウモロコシの種子



図16 広口透明容器に主根が3～5mm伸びたトウモロコシの種子とリンゴを入れ、24時間置いた様子



対照区

リンゴを切らない

リンゴを1/4に切った

エチレン濃度 0 ppm

10 ppm

20 ppm

図17 エチレンが発生している広口透明容器内で24時間置いていたトウモロコシの種子

Ⅲ 結果

1. エチレン発生量に及ぼす温度の影響

広口透明容器にリンゴを1個ずつ入れて、 $17 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、又は $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。そして、48時間後までの各時間に、その容器内のエチレン濃度を測定した。その結果、各時間において、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下でリンゴから発生するエチレン濃度が最も高かった(図18)。次にエチレン濃度が高かったのは、 $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 下であった(図18)。 $17 \pm 1^\circ\text{C}$ 下では、各時間において、エチレン濃度が低かった(図18)。

2. エチレン発生量に及ぼすリンゴを切った影響

広口透明容器にリンゴをそのまま(対照区)1個入れ、そこに1個のリンゴを $1/2$ に切って入れ、そこに1個のリンゴを $1/4$ に切って入れ、又はそこに1個のリンゴを $1/8$ に切って入れて、それらを $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。そして、48時間後までの各時間に、その容器内のエチレン濃度を測定した。その結果、各時間において、リンゴを切らない対照区と比較して、リンゴを切るとエチレン濃度は高くなった(図19)。 $1/2$ に切ったときのエチレン濃度と $1/8$ に切ったときのそれは、各時間において、ほぼ同じであった(図19)。12時間後～48時間後にかけて、 $1/4$ に切ったときのエチレン濃度が最も高かった(図19)。

3. リンゴの品種ごとのエチレン発生量

10品種のリンゴを広口透明容器に1個ずつ入れ、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。24時間後に、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。その結果、「陽光」、「清明」、「シナノゴールド」、及び「ジョナゴールド」の品種では、エチレン濃度が高かった(図20)。

7品種のリンゴをそれぞれ $1/4$ に切って広口透明容器に入れて、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。24時間後に、同様にその容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。その結果、「陽光」の品種以外は全て、リンゴを $1/4$ に切ったときのエチレン濃度は、リンゴを切らないときのそれと比較して高かった(図20)。特に、「サンふじ」及び「ジョナゴールド」の品種では、 $1/4$ に切ったときのエチレン濃度は切らない場合のその約2倍になった(図20)。

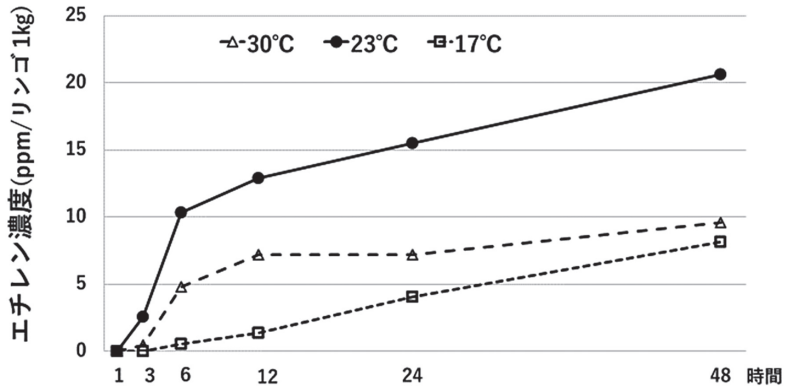


図18 エチレン発生量に及ぼす温度の影響

3つの広口透明容器にリンゴ（品種：ふじ）を1個ずつ入れ蓋をして、 $17 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、又は $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、及び48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

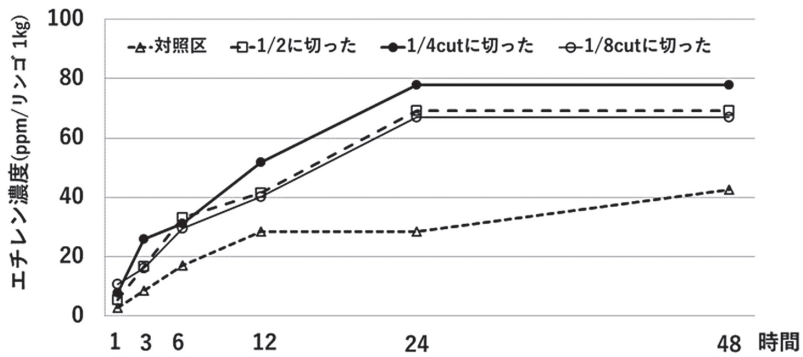


図19 エチレン発生量に及ぼすリンゴを切った影響

4つの広口透明容器を準備し、そこにリンゴ（品種：サンふじ）をそのまま（対照区）1個入れ、そこに1個のリンゴを縦に $1/2$ に切って入れ、そこに1個のリンゴを縦に $1/4$ に切って入れ、又はそこに1個のリンゴを縦に $1/8$ に切って入れ、それぞれ蓋をして、それらを $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に置いた。1時間後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、及び48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

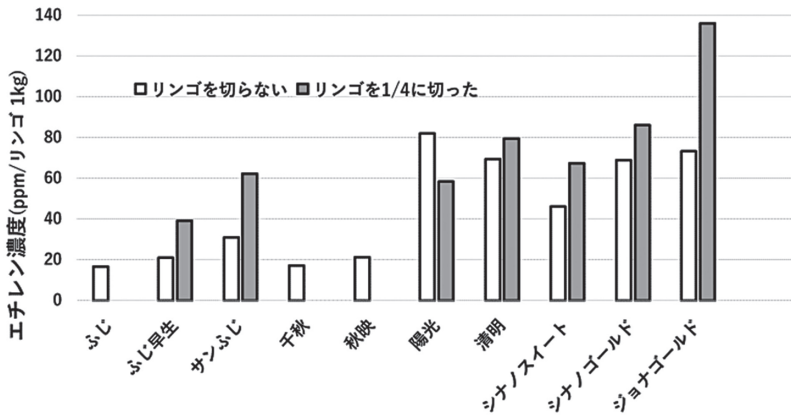


図20 リンゴの品種ごとのエチレン発生量

ふじ、ふじ早生、サンふじ、千秋、秋映、陽光、清明、シナノスイート、シナノゴールド、又はジョナゴールドの品種のリンゴを切らないで広口透明容器に1個ずつ入れ蓋をして、23±1℃下に置いた。24時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。また、ふじ早生、サンふじ、陽光、清明、シナノスイート、シナノゴールド、又はジョナゴールドの1個のリンゴをそれぞれ縦に1/4に切って同容器に入れ蓋をして、23±1℃下に置いた。24時間後に、同様にその容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

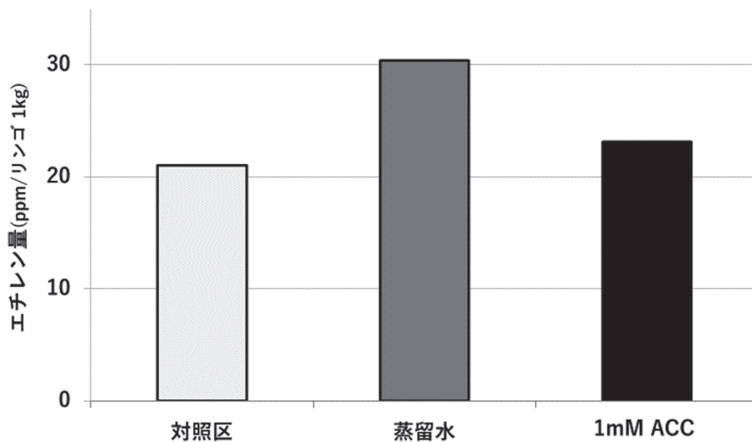


図21 エチレン発生量に及ぼすACCの影響

リンゴ(品種:秋映)2個のへたをペンチでそれぞれ切り取り、その窪みの箇所をメスでむいた。また、対照区として、へたを切らずに窪みの皮もむかないリンゴも1個用意した。それらのリンゴを1個ずつ3つの広口透明容器に入れた後、窪みの皮をむいた箇所にピペットを用いて蒸留水1ml又は1mM ACCを1ml入れた。そして、それらの容器に蓋をして、23±1℃下に置いた。48時間後に、検知管式エチレン測定器を用いて、これら3つの容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

4. エチレン発生量に及ぼすACCの影響

広口透明容器にリンゴ入れ、そのへたの窪みの箇所に蒸留水 1 ml又は 1 mM ACCを 1 ml入れて、 23 ± 1 °C下に置いた。48時間後に、その容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。リンゴに蒸留水を添加したときのエチレン濃度は、リンゴをそのままの状態と同容器に入れた対照区でのそれと比較して少し高かった (図21)。リンゴにACCを添加したときのエチレン濃度は、対照区のエチレン濃度及びリンゴに蒸留水を添加したときのそれと比較して、大幅に高くなることはなかった (図21)。

5. バナナの成熟に及ぼすエチレンの影響

何も入っていない広口透明容器 (対照区)、リンゴを切らずに 1 個入れた同容器、又はリンゴ 1 個を 1 / 4 に切って24時間事前に入れておいた同容器に、未成熟で青色のバナナを 1 本ずつ入れ、 23 ± 1 °C下に48時間置いた。その結果、同容器内のエチレン濃度は、対照区が 0 ppm、リンゴを切らない場合は15ppm、リンゴを 1 / 4 に切って24時間事前に入れておいた場合は20ppmであった。このとき、バナナが熟して青色から黄色に変わった色の違いは、全て同じだった (図22)。

同様に、対照区の広口透明容器、リンゴを切らずに入れた同容器、又はリンゴを 1 / 4 に切って24時間事前に入れておいた同容器に、成熟して黄色になったバナナを 1 本ずつ入れ、 23 ± 1 °C下に48時間置いた。その結果、同容器内のエチレン濃度は、対照区が 0 ppm、リンゴを切らない場合は32ppm、リンゴを 1 / 4 に切って24時間事前に入れておいた場合は40ppmであった。このとき、バナナがさらに熟して黒い斑点が現れる頻度は、全てほぼ同じだった (図23)。

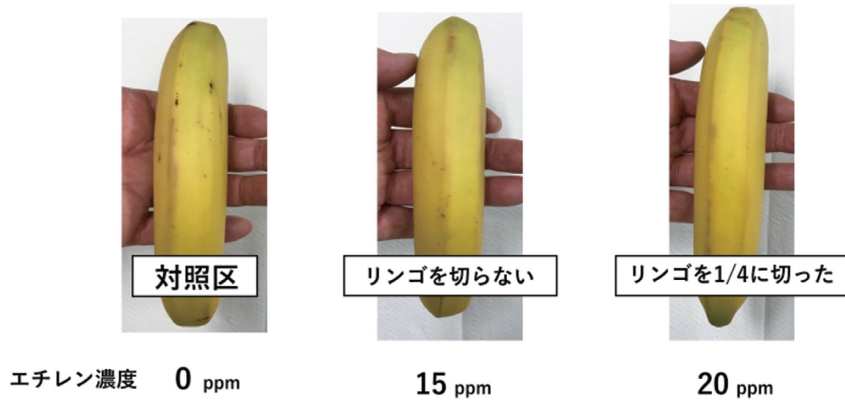


図22 未成熟のバナナに及ぼすエチレンの影響

リンゴ（品種：ふじ早生）1個を縦に1/4に切って広口透明容器入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に24時間事前に置いておいた。また、別の同容器に同じ品種のリンゴを切らずに1個入れた。対照区として、リンゴを入れてない同容器も用意した。次に、未成熟のバナナの中から青色の濃さが同じ3本を選んで、それら3つの容器にそれぞれ1本ずつ入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に48時間置いた。この48時間置いた後に、検知管式エチレン測定器を用いて、容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

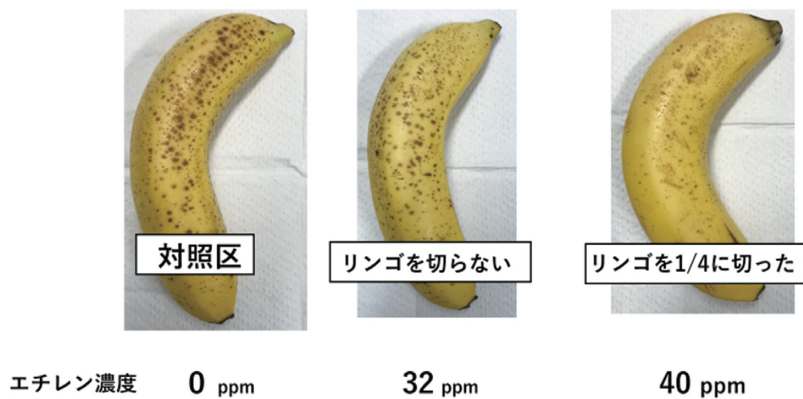


図23 成熟したバナナに及ぼすエチレンの影響

リンゴ（品種：シナノスイート）1個を縦に1/4に切って広口透明容器入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に24時間事前に置いておいた。また、別の同容器に同じ品種のリンゴを切らずに1個入れた。対照区として、リンゴを入れてない同容器も用意した。成熟したバナナの中から黄色の濃さが同じ3本を選んで、それら3つの容器にそれぞれ1本ずつ入れ、蓋をして 23 ± 1 ℃下に48時間置いた。この48時間置いた後に、検知管式エチレン測定器を用いて、容器内のエチレン濃度をそれぞれ測定した。

6. 根の成長に及ぼすエチレンの影響

何も入っていない広口透明容器（対照区）、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って48時間事前に入れておいた同容器に、主根が3～5mm伸びたトウモロコシの種子をそれぞれ10個ずつ入れて、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に24時間置いた。その結果、同容器内のエチレン濃度は、対照区が0 ppm、リンゴを切らない場合は10ppm、リンゴを1/4に切って48時間事前に入れておいた場合は20ppmであった。そして、この時の主根の平均の伸びとその標準誤差は、それぞれ 18.6 ± 1.23 (mm/24時間)、 14.8 ± 1.11 (mm/24時間)、及び 12.1 ± 1.08 (mm/24時間)であった（図24）。

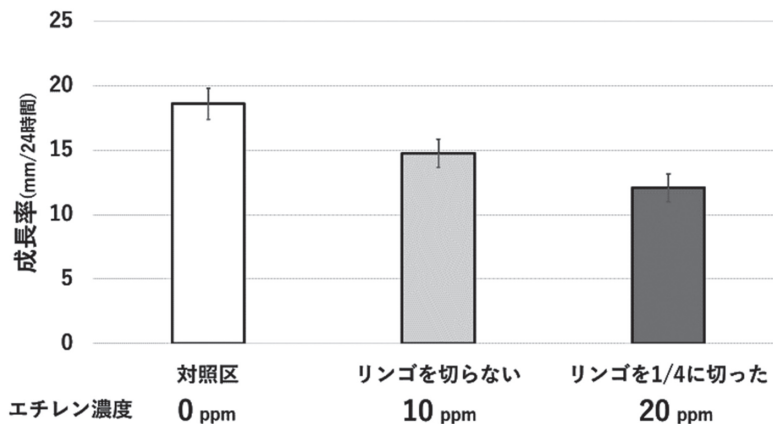


図24 根の成長に及ぼすエチレンの影響

トウモロコシの種子を、水道の流水に約42時間さらして吸水させた。コンテナの底にペーパータオルを1枚敷き、そこに水道水を70ml入れ、吸水したトウモロコシの種子を均等に散らばるように蒔いた。そのコンテナを黒いビニール袋に入れて、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に約30時間置いた。

小さなガラスシャーレの蓋に、丸く切った同じペーパータオルを2重に敷いて、その外周に1～10の数字をマジックインキで書き込んだ。このガラスシャーレの蓋を3つ用意し、3つの広口透明容器に1個ずつ入れた。その内1個の同容器には、リンゴ（品種：サンふじ）1個を縦に1/4に切って入れ、蓋をして $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に48時間事前に置いておいた。

3つの広口透明容器内に入っているガラスシャーレの蓋に、ピペットを用いて蒸留水を6.4mlそれぞれ入れた。上記のコンテナの中から、主根が真っ直ぐに3～5mm伸びた種子を30個選び出し、各主根の長さを電子式ノギスを用いて正確に測りその数値をメモして、ガラスシャーレのペーパータオルに書かれている数字の上に1個ずつ置いた。この時、主根がガラスシャーレの真ん中に向かってそれぞれ伸びるように、各種子を並べた。次に、別の広口透明容器に同じ品種のリンゴを切らずに1個入れた。対照区としては、残りの1つの同容器にはリンゴを入れなかった。

これら3つの広口透明容器に蓋をして、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 下に24時間置いた。この24時間置いた後に、検知管式エチレン測定器を用いて、容器内のエチレン濃度を測定した。次に、ガラスシャーレ内の種子の主根の長さを同じ電子式ノギスを用いて正確に測り、その数値をメモした。そして、主根ごとに24時間当たりで伸びた長さを計算し、その平均値と標準誤差を算出した。

IV 考 察

エチレンは、ガス状の植物ホルモンで、植物のさまざまな生理作用に関わり、成熟した果実からも発生することが知られている^{1) 2) 3)}。高等学校の「生物」の授業において、成熟したリンゴを密封容器内に入れておくとその容器内にエチレンが発生してその濃度が高くなることを実験教材として取り上げる場合は、実際に生徒にエチレンの濃度を測定させなければならない。エチレンの正確な定量には通常ガスクロマトグラフィーを用いる⁹⁾が、高等学校の理科室にはこの機器は設置されていないのが現状である。そこで、本研究では、エチレンの定量に検知管式エチレン測定器(図1及び図2)を用いた。これを使えば、高等学校の「生物」の授業においても、生徒にある程度正確にエチレン量を測定させることができる。

成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、その適温は何度であるのかを上記の「II 研究方法」の「3」ようにして調べた。その結果、23℃下で発生させるエチレン量は、17℃で発生させるその量及び30℃で発生させるその量と比較して多かった(図18)。次に、成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、リンゴを切ることがその発生量にどのような影響を及ぼすのかを、上記の「II 研究方法」の「4」ようにして調べた。リンゴを縦に切ってその容器内に入れておくと、リンゴを切らないで同容器に入れておいた場合と比較して、その容器内でのエチレン発生量は多くなった(図19及び図20)。この結果は、本研究で初めて明らかにされたことである。リンゴの切り方では、1/4に切ったときが、1/2に切ったとき及び1/8に切ったときと比較して、エチレン発生量は多かった(図19)。さらに、成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、リンゴの品種ごとにその発生量が異なるのかを、上記の「II 研究方法」の「5」ようにして調べた。その結果、「ふじ」、「ふじ早生」、「千秋」、及び「秋映」の品種ではエチレン発生量が少なく(図20)、「陽光」、「清明」、「シナノゴールド」、及び「ジョナゴールド」ではその発生量が多かった(図20)。

植物体内では、「メチオニン → S-アデノシルメチオニン → アミノシクロプロパンカルボン酸 (ACC) → エチレン」の経路でエチレンが生合成される^{1) 2) 3)}。そこで、成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、リンゴに高濃度のACCを添加すればエチレン発生量はさらに多くなるのかを、上記の「II 研究方法」の「6」ようにして調べた。結果は、リンゴにACCを添加してもエチレン発生量が多くなることはなかった(図21)。

高等学校の「生物」の教科書には、密封した容器に成熟したリンゴと青いバナナを入れて数日間置いておくと、成熟したリンゴから放出されるエチレンが未成熟のバナナを成熟させて黄色に変える例^{4) 5) 6)}が記載されている。そこで、本研究では実際にこれを上記の「II 研究方法」の「7」ようにして追実験してみた。何も入っていない3ℓの密封容器(対照区)、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って24時間事前に入れておいた同容器に、未成熟で青色のバナナを1本ずつ入れて蓋をし、48時間置いた。結果は、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm(対照区)、15ppm、又は20ppmになったが、このエチレン濃度の差に依存しないで、3つの実験区でバナナが青色から一様に黄色に変わってしまった(図22)。また、同様に3つの密封容器にある程度成熟

した黄色のパナナを48時間入れると、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm (対照区)、32ppm、又は40ppmであったが、3つの実験区で一様に黒い斑点が現れた(図23)。これらの結果は、教科書に記載されているこの実験例^{4) 5) 6)}を再現するのは容易でないことを示した。加えて、成熟していない青色のパナナをスーパーマーケットや青果店で入手すること自体、難しいことでもある。別の「生物」の教科書には、密封容器に成熟したリンゴと未成熟のリンゴを入れて、成熟したリンゴから放出されるエチレンが未成熟のリンゴを成熟させる例⁷⁾が載っているが、リンゴの成熟度合を正確に判定することは困難であり、又成熟していないリンゴを入手することも難しい。さらに別の教科書には、密封容器に成熟したリンゴと葉のついたツバキの枝を入れて、リンゴから放出されるエチレンがツバキの葉を落葉させる例⁸⁾も示されている。しかし、この実験例でも、エチレンの作用で落葉するか又はしないかを確認するだけで、エチレンの濃度の違いによるその生理反応の大きさを数値化することはできない。以上のことから、植物からエチレンを発生させ、そのエチレンを植物に与え、そのエチレンの濃度に依存した植物の生理反応の大きさを正確に数値に置き換えることができる、新たな実験教材を開発する必要が出てきた。

密封容器に成熟したリンゴを入れてエチレンを発生させ、そのエチレンが根の成長を阻害する1) ことを明確に示すような、新たなエチレンの実験教材を開発することを試みた。「Ⅱ 研究方法」の「7」ようにして、何も入っていない3ℓの密封容器(対照区)、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って48時間前に入れておいた同容器に、主根が3~5mm伸びたトウモロコシの種子を選んでそれぞれ10個ずつ入れ蓋をし、24時間置いた。その結果、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm (対照区)、10ppm、又は20ppmになった(図24)。このとき、トウモロコシの主根の成長はエチレンの作用で阻害され、エチレンの濃度が高いほどその阻害率が高くなった(図24)。この実験によって、エチレンの濃度に依存した植物の生理反応を正確に数値化することが可能な新たな教材を開発できた。

高等学校学習指導要領解説理科編 理数編(平成30年告示)には、「植物の成長や反応に植物ホルモンが関わることを見いださせるには、例えば、エンドウの芽生えをリンゴの果実と一緒に袋に入れ密閉したものと芽生えだけを密閉したものを数日間栽培する実験を行い、実験前後におけるそれぞれの芽生えの長さや太さを計測した結果を分析して解釈し、エンドウの芽生えの伸長や肥大にリンゴの果実が影響を与えることに気付かせることなどが考えられる。さらに、一緒に入れる果物の種類や数量などにも注目して課題を設定し、仮説を立てて実験を計画させることも考えられる。」と記載されている。本研究で検証したトウモロコシの根の成長にエチレンが影響を及ぼすことは、植物の成長や反応に植物ホルモンが関わることを見いださせ、課題を設定し、仮説を立てて実験計画を計画させる過程に有効であることを示している。今後は、高等学校の「生物」の授業でこれを実践し、生徒の変容のデータを取りながら有効性を論じる必要がある。

V まとめ

エチレンの定量には、高等学校の「生物」の授業で使いやすい、検知管式エチレン測定器を用いた。成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、その適温は何度であるのかを調べた。その結果、23℃下で発生させるエチレン量は、17℃で発生させるその量及び30℃で発生させるその量と比較して多かった。次に、成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、リンゴを切ることでその発生量にどのような影響を及ぼすのかを調べた。リンゴを縦に切ってその容器内に入れておくと、リンゴを切らないで同容器に入れておいた場合と比較して、その容器内でのエチレン発生量は多くなった。リンゴの切り方では、1/4に切ったときが、1/2に切ったとき及び1/8に切ったときと比較して、エチレン発生量は多かった。さらに、成熟したリンゴを密封容器内に入れておいてエチレンを発生させるときに、リンゴの品種ごとにその発生量が異なるのかを調べた。その結果、「ふじ」、「ふじ早生」、「千秋」、及び「秋映」の品種ではエチレン発生量が少なく、「陽光」、「清明」、「シナノゴールド」、及び「ジョナゴールド」ではその発生量が多かった。

何も入っていない3ℓの密封容器(対照区)、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って23℃下で24時間事前に入れておいた同容器に、未成熟で青色のバナナを1本ずつ入れて蓋をし、23℃下で48時間置いた。結果は、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm(対照区)、15ppm、又は20ppmになったが、このエチレン濃度の差に依存しないで、3つの実験区でバナナが青色から一様に黄色に変わってしまった。また、同様に3つの密封容器にある程度成熟した黄色のバナナを48時間入れると、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm(対照区)、32ppm、又は40ppmであったが、3つの実験区で一様に黒い斑点が現れた。

トウモロコシの種子を流水中で吸水させた後、ペーパータオル上に播種した。発根した種子の中から、主根が真っ直ぐに3~5mm伸びたものを選んだ。ガラスシャーレに、ペーパータオルを2枚敷いて、水で湿らせた。そのペーパータオル上に選んだ種子を10個並べた。何も入っていない3ℓの密封容器(対照区)、リンゴを切らずに1個入れた同容器、又はリンゴ1個を1/4に切って23℃下で48時間事前に入れておいた同容器にこのガラスシャーレをそれぞれ入れ、容器に蓋をして23℃下で24時間置いた。その結果、3つの容器内のエチレン濃度はそれぞれ0 ppm(対照区)、10ppm、又は20ppmになった。このとき、トウモロコシの主根の成長はエチレンの作用で阻害され、エチレンの濃度が高いほどその阻害率が高くなった。密封容器に成熟したリンゴを入れてエチレンを発生させ、そのエチレンが根の成長を阻害することを明確に示す、新たな実験教材をここに提唱できた。

引用・参考文献

- 1) 倉石晉 (1988) 「UP BIOLOGY 植物ホルモン [第2版]」 東京大学出版会 pp.98-112
- 2) 森仁志 (2001) 「朝倉植物生理学講座4 成長と分化」 朝倉書店 pp.36-49
- 3) 桜井英博 ほか3名 (2001) 「植物生理学入門」 培風館 pp.265-269
- 4) 嶋田正和 ほか21名 (2014) 「文部科学省検定済教科書 生物」 数研出版 pp.260
- 5) 庄野邦彦、馬場昭次 ほか12名 (2015) 「文部科学省検定済教科書 生物」
実教出版 pp.236
- 6) 本川達雄、谷本英一 ほか16名 (2013) 「文部科学省検定済教科書 生物」
新興出版社啓林館 pp.289
- 7) 浅島誠 ほか20名 (2014) 「文部科学省検定済教科書 生物」 東京書籍 pp.288
- 8) 吉里勝利 ほか16名 (2014) 「文部科学省検定済教科書 高等学校生物」
第一学習社 pp.257
- 9) 田中信行 ほか28名翻訳 (1968) 「改訂4版 機器による化学分析」 丸善pp.397-423

Summary

Teaching materials of ethylene which is a phytohormone

—Determination of ethylene produced from apples and
effect of ethylene on the root growth—

KATO Ryoichi¹⁾, NAGASE Miyuki²⁾, NAGANE Tomohiro³⁾

Caryopses of corn were immersed in running tap water and the imbibed caryopses were planted on wet paper towel. The 10 caryopses with the 3-5 mm primary root were selected and putted on wet paper towel in a petri dish. These petri dishes were placed in the 3 L container without an apple (control), in the container with an apple of no cutting, or in the container, in which an apple cutting into 1/4 was pre-incubated at 23°C for 48 hours, with a cutting apple. Three containers were put the lid and they were incubated at 23°C for 24 hours. After the incubation, the ethylene concentrations in the three containers were 0 ppm (control), 10 ppm, and 20 ppm, respectively. At this time, the growth of the primary roots was inhibited by the ethylene and the inhibition rate depended on the concentration of ethylene. This was proposed as a new teaching material of ethylene in biology of the high school. The ethylene concentration was measured using an ethylene measuring instrument of tube type at this experiment.

1) Primary Education, Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University

2) Food and Nutrition, Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University

3) Hokkaido University of Education, Kushiro Campus