

# 酸素濃度の急減に伴うエダマメおよびミニトマトの呼吸活性 とエチレン生成の応答性

誌名	園藝學會雜誌
ISSN	00137626
巻/号	715
掲載ページ	p. 710-715
発行年月	2002年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 酸素濃度の急減に伴うエダマメおよびミニトマトの呼吸活性 とエチレン生成の応答性

中野浩平<sup>1</sup>・中村宣貴<sup>2</sup>・椎名武夫<sup>2</sup>・前澤重禮<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岐阜大学農学部 501-1193 岐阜市柳戸1-1

<sup>2</sup> 独立行政法人食品総合研究所 305-8642 茨城県つくば市観音台2-1-12

### Changes in Respiration and Ethylene Production Rates by Young Soybean and Cherry Tomato Fruits Exposed to an Abrupt Decrease in Oxygen Concentration

Kohei Nakano<sup>1</sup>, Nobutaka Nakamura<sup>2</sup>, Takeo Shiina<sup>2</sup> and Shigenori Maezawa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

<sup>2</sup> National Food Research Institute, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

#### Summary

Responses of respiration and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> production in young soybean and cherry tomato fruits to an abrupt decrease in O<sub>2</sub> concentration was investigated. The rates of O<sub>2</sub> consumption, CO<sub>2</sub> evolution and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> production under ambient atmosphere and when O<sub>2</sub> concentration was abruptly decreased from 21% to 3.5% were compared. A mathematical model, which assumes the exponential gas exchange with the time after the completion of O<sub>2</sub> gas replacement, fitted well with the experimental data. The response rate constant *K*, which was newly defined, enabled the quantitative evaluation of the response to low O<sub>2</sub> atmosphere. *K* values for O<sub>2</sub> consumption, CO<sub>2</sub> evolution and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> production differed; CO<sub>2</sub> evolution had the lowest *K* value among gases. Moreover, *K* value for CO<sub>2</sub> evolution depended on the species and maturity. These results may be attributed to the differences in O<sub>2</sub> metabolism and physical properties, such as gas solubility, skin permeability and tissue structure.

**Key Words:** cherry tomato, ethylene production, modified atmosphere, respiration, young soybean.

#### 緒言

修正ガス環境下における収穫後の青果物の呼吸速度は、呼吸抑制による品質保持効果を期待したCA貯蔵あるいはMA包装設計において重要なパラメータである。それゆえ、修正ガス環境による呼吸抑制のメカニズムを解明することは極めて重要な課題となっており、これまでも各種青果物の呼吸特性についての知見が蓄積、整理されてきた。その中でも、低酸素濃度は呼吸を抑制し、酸素濃度と呼吸速度の関係は、酵素反応動力学モデルであるMichaelis-Menten型の式で記述可能であることが明らかとなっている(Hertogら, 1998; Leeら, 1991; 中野ら, 2001)。一方、高二酸化炭素濃度の影響について、Kuboら(1990)は、直接的な呼吸抑制効果が認められない

青果物が多いことを指摘し、エチレンを生成している青果物では高濃度二酸化炭素がエチレンの呼吸促進作用を抑制し、結果的に呼吸抑制が起こるという考えを提唱している。これまでに得られてきた低酸素、高二酸化炭素濃度の呼吸抑制効果に関する知見の多くは、測定対象物が修正ガス組成に対して十分に順応した時点での計測結果に基づいたものであった。修正ガス環境による呼吸抑制の機作解明に向けては、従来から計測されてきた安定状態の呼吸特性に注目するのみならず、修正ガス環境に順応するまでの過程を含めた呼吸反応の挙動について議論する必要があると考えられる。順応過程を解析することで、ガス環境変動に対する呼吸反応の動的特性が明確となり、個体レベルでの呼吸反応を理解しようとする上で、静的特性のみを捉えた解析からは得難い重要な知見が得られることが期待される。

これまでに著者らは、フレキシブル呼吸速度測定法(秋元ら, 2000)により変動ガス環境下での数種青果物の呼吸速度を計測し、特にキュウリ果実では、ガス濃度変化速

2001年11月7日 受付。2002年3月1日 受理。

本研究は、(財)日本科学協会による平成13年度笹川科学研究助成により行われた。

\*Corresponding author.

度が呼吸反応に影響を及ぼす可能性を示唆した(中野ら, 1998, 1999; 胡ら, 1999). また, 壇ら(1995)は急激な酸素濃度の変化が数種青果物の呼吸速度に与える影響について検討し, 品目によって呼吸反応の応答性に違いがあることを明らかにした. しかしながら, 呼吸反応を二酸化炭素排出速度のみでしか評価しておらず, 酸素吸収速度の応答性についての言及は何らなされていない.

そこで本研究では実験材料として, 主な呼吸活性部位の子実体が外皮に覆われているという点で特徴的であるエダマメと, 呼吸活性に対し大きな影響を及ぼすエチレンを生成するミニトマトを取り上げ, 雰囲気中の酸素濃度を通常大気状態から低酸素状態へと急減させた前後の酸素吸収速度, 二酸化炭素排出速度, さらに呼吸反応に密接に関係したエチレン生成速度を経時的に計測した. そして, 呼吸反応およびエチレン生成反応が低酸素濃度に順応するまでの過程を捉えた上で, 低酸素濃度に対する各ガス代謝の応答性について検討したので報告する.

## 材料および方法

### 1. 供試材料

供試材料には, エダマメ 'エゾミドリ' とミニトマト 'ココ' を用いた. いずれの材料も, 早朝に生産者の圃場より収穫し, 実験室へ搬入後, 20℃設定のインキュベータ内に24時間静置し品温を安定させた後, 実験に供試した. エダマメは莢を枝から分離し莢のみを, ミニトマトは熟度の影響を検討するため, Mature green stage と Full ripe stage の果実をそれぞれ収穫し, 実験に使用した.

### 2. 呼吸速度およびエチレン生成速度の計測

酸素吸収, 二酸化炭素排出およびエチレン生成速度は, 既報(中野ら, 2001)の自動ガス代謝速度計測装置を, 新たにエチレンについても同時に分析できるように改造した装置によって測定した. 本装置は Inaba ら(1989)の報告を参考に市販のガスクロマトグラフをベースに作成したもので, サンプルの入ったチャンバーに一定流量のガスを通気し, 通気前後のガス濃度差をガス代謝速度に換算する通気式の原理に基づく装置である.

既報からの変更点は, エチレン分析のために検出器として FID およびポラパック Q カラム (2 m × φ 3 mm) を追加し, 新たに設けた容量 2.0 ml の計量管のついたサンプルループにより, 常に一定容量のサンプルガスを自動的にガスクロマトグラフィに注入できるようにした点である. キャリアガスには TCD, FID ともにヘリウム (流量 50 ml · min<sup>-1</sup>) を使用した. カラム, 検出器温度はそれぞれ 60℃ と 80℃ とした. 本分析条件における一回の分析所要時間は 8 分であり, 通気前後のガス組成をそれぞれ分析する必要から, 酸素吸収速度, 二酸化炭素排出速度およびエチレン生成速度について 16 分おきにデータを収集した.

実験では, エダマメ, ミニトマトそれぞれ約 700 g を内

容積 2.5 liter のチャンバーに充填し, まず, 酸素濃度 21% (バランス: 窒素) のガスをチャンバー内へ通気した. 通気ガスは, マスフローコントローラを装備したガス混合器によって, 高純度酸素ガスおよび窒素ガスを混合して得た. 呼吸速度およびエチレン生成速度が安定しているのを確認した後, 通気ガスの酸素濃度が, 一般的な青果物の CA 貯蔵条件の範囲であり, また有効に呼吸速度が抑制される 3.5% (Beaudry, 1999) となるよう酸素および窒素ガスの流量比を再設定して, 測定を続けた. チャンバーへ通気したガスの流量は酸素濃度 21% 時, 3.5% 時ともに 100 ml · min<sup>-1</sup> であった. 測定温度は 20℃ とし, 測定は 3 回繰り返した.

### 3. 酸素濃度の急減に伴うガス代謝の応答性の解析

雰囲気酸素濃度を 21% から 3.5% に急減させた直後からの, 二酸化炭素, 酸素およびエチレンそれぞれのガス代謝速度の変化を (1) 式によって仮定した.

$$\frac{v-v_e}{v_0-v_e} = \exp(-Kt) \quad (1)$$

ここに,

$v$ : 雰囲気酸素濃度を急減してから  $t$  時間後のガス代謝速度 (mg · kg<sup>-1</sup> · hr<sup>-1</sup>)

$v_0$ : 酸素濃度 21% 時のガス代謝速度 (mg · kg<sup>-1</sup> · hr<sup>-1</sup>)

$v_e$ : 酸素濃度 3.5% 環境下に十分順応した時のガス代謝速度 (mg · kg<sup>-1</sup> · hr<sup>-1</sup>)

$K$ : 応答速度定数 (hr<sup>-1</sup>)

$t$ : 酸素濃度を 3.5% に急減してからの時間 (hr)

本研究では, (1) 式の  $K$  と  $v_e$  を未知パラメータとし, 非線形最小自乗法により実測値への当てはめを行った. ここで,  $v_e$  を未知パラメータとして推定したのは, 酸素濃度 3.5% 環境下に充分順応した時のガス代謝速度が, 計測誤差のため必ずしも一定値で安定せず定数として決定し難い場合と, ガス代謝速度が実験した時間範囲内で減少を続け一定値を示さない場合を考慮したためである. 非線形最小自乗法によるパラメータの推定は, 自作の BASIC プログラムによって行った.

## 結果および考察

### 1. 酸素濃度急減前後のガス代謝速度の変化

第 1 図に, 酸素濃度を 21% から 3.5% に急減させた前後の二酸化炭素排出量, 酸素吸収量およびエチレン生成速度の変化を示した. 酸素濃度を急減させた時点をも 0 とし横軸を表示したが, 急減から 1.5 時間までのデータは, 呼吸チャンバー内のガス置換や, ガス混合器の濃度設定変更に伴う短期的な流量変動があることにより, 正確な測定ができなかったのでプロットから除外した. また, エダマメや Mature green stage のミニトマトにおいてはエ

チレンは検出されなかったため、エチレン生成速度のデータは省略した。

エダマメの二酸化炭素排出速度および酸素吸収速度は、酸素濃度 21% の環境下ではそれぞれ  $217, 127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  付近の値で推移した。酸素濃度を 3.5% に急減させると、変更後 1.5 時間までの間に二酸化炭素排出速度は  $184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  を示し、酸素濃度 21% 時の呼吸速度を 100% とする相対値では 85% に抑制された。その後、指数関数的に減少し、実験終了時には  $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (相対値 30%) まで減少した。一方、酸素吸収速度は、酸素濃度を変更してから 1.5 時間の時点で  $54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (相対値 43%) まで大きく減少し、同時点での二酸化炭素排出速度の相対速度と比較すると 2 倍程度の抑制が認められた。このことから、二酸化炭素排出速度と酸素吸収速度では雰囲気酸素濃度の急変に対する応答が異なるようであった (第 1 図 B)。

同様の傾向はミニトマトにおいても認められた。Mature green stage のミニトマトにおいては、酸素濃度 21% 時の二酸化炭素排出速度は、 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  前後であった。酸素吸収速度は、ばらつきがあったが平均して  $31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  で推移した。このデータのばらつきは、自動ガス代謝速度計測装置の計測誤差によるものと考えられる。本装置の中心であるガスクロマトグラフィの測定精度は、分析対象ガスが高濃度になるほど低下する傾向にある。0% 付近を測定域とする二酸化炭素に比べ、21% 付近という高濃度域を測定域とする酸素においては、通気前後の濃度差の定量に際し、誤差が生じやすく、結果としてデータがばらついたものと考えられる。酸素濃度を急減させて 1.5 時間後の二酸化炭素排出速度は、21% 時と同様の値である  $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  を示したが、その後は緩やかに減少し、 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  で安定した。一方、酸素吸収速度は、直ちに安定状態と同様のレベルまで抑制された (第 1 図 C)。

Full ripe stage のミニトマトにおいては、酸素濃度 21% 環境下における二酸化炭素排出速度と酸素吸収速度は、Mature green stage のミニトマトよりも若干大きな値である  $31.5$  および  $34.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  前後を推移した。酸素濃度を急減させると、二酸化炭素排出速度については Mature green stage のミニトマトと同様、急減後 1.5 時間では 21% 酸素濃度下と同様の値を示した。その後、実験終了時まで減少傾向を示し、酸素濃度の急減から 25 時間では  $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  にまで抑制された。酸素吸収速度については酸素濃度の急減後、直ちに安定状態と同様のレベルまで抑制され、 $11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  前後を推移した。

Full ripe stage のミニトマトではエチレンの生成も観測され、その生成速度は、酸素濃度 21% 環境下では  $14 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  を示した。酸素濃度の急減後 1.5 時間では  $3.8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  まで抑制され、その後も指数関数的に減

少し、酸素濃度の急減から 25 時間では、 $0.8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  で安定した (第 1 図 D)。

壇ら (1995) は、数種青果物を対象として、雰囲気酸素濃度の急減に対する二酸化炭素排出速度の応答性について検討し、① 雰囲気中の酸素濃度を低下させるとただちに二酸化炭素排出量は抑制され、以後、抑制程度が実験終了時まで維持されたもの、② 低酸素条件に対する応答

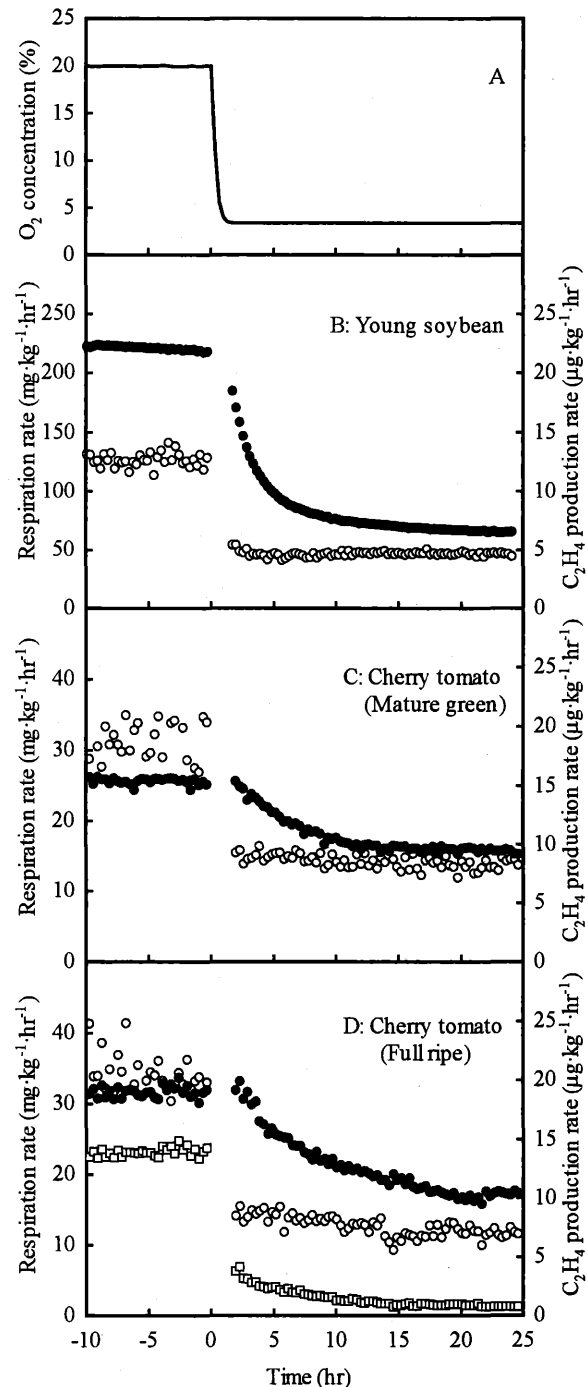


Fig. 1 O<sub>2</sub> concentration at outlet of respiration chamber (A) and O<sub>2</sub> consumption (○), CO<sub>2</sub> evolution (●) and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> production rates (□) of young soybean (B) and cherry tomato fruits (mature green (C), full ripe (D)) at 20 °C.

は①型ほど速くはなく、雰囲気中の酸素濃度を低下させると二酸化炭素排出量は一定時間直線的に減少を続けた後安定し、以後、その抑制程度が実験終了時まで維持されたもの、③低酸素条件に対し時間の経過と共に二酸化炭素排出量が漸減したものの3つの型に分類できるとし、CA条件に対する感受性は青果物の種類によって異なることを示唆した。本研究で試験したエダマメ、ミニトマトの二酸化炭素排出速度の変化に着目すると、エダマメは①型に、Mature green stageのミニトマトは②型に、Full ripe stageのミニトマトは③型に分類され、本研究において、品目のみならず熟度によっても二酸化炭素排出速度のガス環境変更に伴う応答性は異なることが示唆された。

しかしながら、その分類は定性的であり客観的指標に基づいたものではない。そこで本研究では、酸素、二酸化炭素、エチレンそれぞれについてのガス代謝の応答性を定量的に議論するため、新たに応答速度定数  $K$  を定義した。

## 2. 応答速度定数 $K$ に基づく低酸素濃度に対するガス代謝速度の応答解析

第1表に(1)式によって推定された、二酸化炭素排出速度、酸素吸収速度およびエチレン生成速度の雰囲気酸素濃度の急減に伴う応答速度定数  $K$  と、(1)式による近似値と実測値との間の決定係数  $R^2$  を示した。決定係数は Mature green および Full ripe stage のミニトマトの酸素吸収速度において若干低い値を示したが、その他はいずれにおいても0.94以上と極めて高く、(1)式は酸素濃度を急減した後のガス代謝の変化を高い精度で近似していることが示された。すなわち、本研究で得られた応答速度定数  $K$  (以下、 $K$  値) は、ガス環境の変動に伴うガス代謝の応答性を定量的に示す指標になりうると考えられる。

$K$  値が大きい程、素早くある特定の低酸素条件に対応するガス代謝速度に達することを意味する。Full ripe stage のミニトマトでは、酸素吸収に関する  $K$  値が最も大きく、エチレン生成の  $K$  値は、それより若干小さかった。また、二酸化炭素排出の  $K$  値が最も小さかったが、このことは

エダマメ、Mature green stage のミニトマトにおいても同様であった。 $K$  値による解析により、雰囲気酸素濃度の低下に対する応答は、酸素吸収は極めて敏感であり、ついでエチレン生成、そして二酸化炭素排出の順に鈍くなることが明確となった。

好気的な呼吸代謝において、酸素吸収は電子伝達系の最終過程で起こる。すなわちこの反応では、酸素が基質として必要とされるので、低酸素環境に対して直接的な影響を受けることが推察される。一方、二酸化炭素はTCA回路の中で、ピルビン酸脱水素酵素、イソクエン酸脱水素酵素および $\alpha$ -ケトグルタル酸脱水素酵素による反応の過程で生じる産物である。これらの反応に必要な  $NAD^+$  は、酸素を必要とする電子伝達系の中で供給される必要があり、二酸化炭素生成の反応における酸素の役割は間接的である(茶珍・緒方, 1977)。また、エチレンについては、生成の最終段階で酸素が必要とされ、1-アミノシクロプロパン1-カルボン酸が酸化されることによって生成されることが明らかとなっており (Peiser ら, 1984)、低酸素濃度は直接的にこの反応に影響を与えるものと考えられる。このような、各ガス代謝反応における酸素の関与の仕方が直接的か、あるいは間接的であるかの違いが、雰囲気酸素濃度の低下に対する酸素吸収、二酸化炭素排出およびエチレン生成速度の応答性に差異を生じさせたのかもしれない。

物質移動の観点から見ると、呼吸反応は①個体内部への酸素の移動、②細胞内での酸素の利用と二酸化炭素の生成、③生成された二酸化炭素の個体外への移動の3つのステップにより成り立っていると考えられている (Andrich ら, 1991)。エチレンについても同様に、②および③段階の二酸化炭素をエチレンに置き換えてもよいと考えられる。

①段階での青果物内への酸素の供給は、雰囲気中と細胞間隙中の酸素分圧の差が駆動力となる (Andrich ら, 1989, 1998)。雰囲気中の酸素濃度が小さくなると、青果物内外の酸素分圧差も小さくなり、結果として酸素吸収

Table 1. Response rate constant  $K$  for  $O_2$  consumption,  $CO_2$  evolution and  $C_2H_4$  production defined as equation (1).

Vegetables		Response rate constant $K$ ( $hr^{-1}$ )	Determination coefficient $R^2$
Young soybean	$O_2$ consumption	$1.645 \pm 0.212$	0.962
	$CO_2$ evolution	$0.415 \pm 0.050$	0.989
Cherry tomato (Mature green)	$O_2$ consumption	$0.680 \pm 0.095$	0.570
	$CO_2$ evolution	$0.164 \pm 0.021$	0.958
Cherry tomato (Full ripe)	$O_2$ consumption	$0.694 \pm 0.094$	0.733
	$CO_2$ evolution	$0.092 \pm 0.012$	0.968
	$C_2H_4$ production	$0.624 \pm 0.075$	0.947

Data show the means  $\pm$  SD of 3 replicates.

速度は小さくなる。このように、個体レベルで見たときの酸素吸収速度は雰囲気酸素濃度に直接的に影響されるため、雰囲気酸素濃度の変更に対して迅速に反応したものと考えられる。一方、二酸化炭素やエチレンの生成速度は、青果物の内部酸素の影響を受けるが、青果物自身には大きさがあるため、雰囲気酸素濃度が低下しても青果物内部の酸素濃度は直ちに低下しないものと考えられる。このことが、酸素吸収の応答よりも二酸化炭素排出やエチレン生成の応答が遅れた要因の1つであるかもしれない。

③段階の生成物の排出について着目すると、液体に対するエチレンの溶解度は酸素の4倍であり、二酸化炭素については酸素の28倍と大きく、特に細胞内で生成された二酸化炭素は、ガス体として個体外に排出されにくい傾向にあると思われる。つまり、雰囲気中の酸素濃度を急減させた後も、細胞質内には21%酸素濃度時に溶解した比較的多量の二酸化炭素が残存しており、それらが引き続きガス体となって排出された結果として応答が遅れが生じた可能性も考えられる。また、果皮面のガス透過性も個体内外へのガス移動に関係するが、Wild・Pepelenbos (2001)は西洋ナシの果皮面のガス透過度を測定し、酸素と比較して二酸化炭素に対する透過性が低いことを示している。すなわち、エダマメやミニトマトにおいても二酸化炭素は、酸素と比較して果皮面での物質移動の点で不利な状態にあり、このことが応答が遅れが生じさせた要因かもしれない。

酸素濃度の急減に対する応答性の違いは、青果物の種類や熟度によっても認められた。特に二酸化炭素排出速度に関する $K$ 値は、エダマメが最も大きく、次いでMature green stage、そしてFull ripe stageのミニトマトの順であった。Cameron・Yang (1982)はトマト果実のガス拡散抵抗について検討し、緑熟トマトより成熟トマトのガス拡散抵抗が大きいことを示した。また、リンゴ、ナシ、ネクタリン果実内における酸素濃度勾配について検討したRajakseら(1990)の報告は、果肉部も果皮部と共にガス拡散の抵抗になることを明らかにし、果肉部の細胞間隙率がガス拡散抵抗に関係していることを示唆した。さらに、成熟したリンゴ果実では、細胞間隙率が未熟な果実と比較して小さく、結果としてガス拡散抵抗が大きくなったことを推察した。青果物の種類や熟度によってガス代謝の応答性に差が生じたのは、ガス拡散抵抗に関連する細胞間隙の発達程度や、果皮面の透過性などの物理的構造が品目、熟度によって異なることが関係しているのかもしれない。

本研究では、雰囲気酸素濃度の急減に対する酸素吸収、二酸化炭素排出およびエチレン生成の応答性はそれぞれ異なり、青果物の種類、熟度によっても応答に差があることを明らかにし、この現象について主に物理的側面を中心に考察した。個体レベルでの修正ガス環境による呼

吸抑制メカニズムの解明に向けて、今後はさらに、低酸素濃度に対するガス代謝の応答に及ぼす温度の影響や、二酸化炭素濃度の急増に対する応答性について明らかにするとともに、生理的な面からの検討も進める必要がある。

## 摘 要

低酸素環境に対するエダマメやミニトマト果実の呼吸やエチレン生成の応答性について検討した。雰囲気酸素濃度を21%から3.5%へと急減させた前後の酸素吸収、二酸化炭素排出およびエチレン生成速度を測定した。低酸素環境に変更することによってガス代謝速度は指数関数的に減少すると仮定した数学モデルは実測値とよく一致し、新たに定義された応答速度定数 $K$ によって低酸素濃度に対する各ガス代謝の応答性の定量的な評価が可能となった。 $K$ 値は、酸素吸収、二酸化炭素排出、エチレン生成でそれぞれ異なり、特に二酸化炭素排出の応答が鈍いことが明らかとなった。また、二酸化炭素排出の $K$ 値は青果物の種類、熟度によっても異なった。これらの結果は、ガス代謝過程の違いや、ガスの溶解度、果皮面の透過性および果肉組織の構造といった物理的性質の違いが原因しているかもしれない。

## 引用文献

- 秋元浩一・内野敏剛・中野浩平・安永円理子・黒木信一郎・濱中大介. 2000. フレキシブル呼吸速度測定法. 園学雑. 69:646-652.
- Andrich, G., R. Fiorentini, A. Tuci and C. Galoppini. 1989. Skin permeability to oxygen in apples stored in controlled atmosphere. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 770-775.
- Andrich, G., R. Fiorentini, A. Tuci, A. Zinnai and G. Sommoigo. 1991. A tentative model to describe the respiration of stored apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 478-481.
- Andrich, G., A. Zinnai, S. Balzini, S. Silvestri and R. Fiorentini. 1998. Aerobic respiration rate of Golden Delicious apples as a function of temperature and  $P_{O_2}$ . *Postharvest Biol. Technol.* 14: 1-9.
- Beaudry, R. M. 1999. Effect of  $O_2$  and  $CO_2$  partial pressure on selected phenomena affecting fruits and vegetable quality. *Postharvest Biol. Technol.* 15: 293-303.
- Cameron, A. C. and Yang, S. F. 1982. A simple method for the determination of resistance to gas diffusion in plant organs. *Plant Physiol.* 70: 21-23.
- 茶珍和雄・緒方邦安. 1977. 呼吸生理. p.34-56. 緒方邦安編. 青果保蔵汎論. 建帛社. 東京.
- 壇 和弘・永田雅靖・山下市二. 1995. 数種野菜の呼吸におよぼす低酸素の影響. 日食低温誌. 21: 3-8.

- Hertog, M. L. A. T. M., H. W. Peppelenbos, R. G. Evelo and L. M. M. Tijskens. 1998. A dynamic and generic model of gas exchange of respiring produce: The effect of oxygen, carbon dioxide and temperature. *Postharvest Biol. Technol.* 14: 335-349.
- 胡 文忠・安永円理子・秋元浩一・内野敏剛・中野浩平. 1999. 生シイタケの呼吸特性. *農機誌*. 61(3): 105-110.
- Inaba, A., Y. Kubo and R. Nakamura. 1989. Automated microcomputer system for measurement of O<sub>2</sub> uptake, CO<sub>2</sub> output and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> evolution by fruit and vegetables. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 58: 443-448.
- Kubo, Y., A. Inaba and R. Nakamura. 1990. Respiration and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> production in various harvested crops held in CO<sub>2</sub>-enriched atmospheres. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115: 975-978.
- Lee, D. S., P. E. Hagggar, J. Lee and K. L. Yam. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *J. Food Sci.* 56: 1580-1585.
- 中野浩平・胡 文忠・安永円理子・秋元浩一. 1998. 動的ガス環境下におけるキュウリ果実の呼吸特性. *農機誌*. 60(3): 31-36.
- 中野浩平・胡 文忠・安永円理子・前澤重禮・秋元浩一. 1999. 動的ガス環境下におけるトマト果実の呼吸特性. *農機誌*. 61(1): 107-113.
- 中野浩平・中村宣貴・椎名武夫・前澤重禮. 2001. 修正ガス環境下におけるエダマメの呼吸速度予測モデル. *農機誌*. 63(6): 73-78.
- Peiser, G. D., T. Wang, N. E. Hoffman, S. F. Yang, H. Liu and C. T. Walsh. 1984. Formation of cyanide from carbon 1 of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid during its conversion to ethylene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 81: 3059-3063.
- Rajapakse, N. C., N. H. Banks, E. W. Hewett and D. J. Cleland. 1990. Development of oxygen concentration gradients in flesh tissues of bulky plant organs. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115: 793-797.
- Wild, H. P. J. and H. W. Peppelenbos. 2001. Improving the measurement of gas exchange in closed systems. *Postharvest Biol. Technol.* 22: 111-119.