

フレキシブル呼吸速度測定法

秋元浩一¹・内野敏剛¹・中野浩平³・安永円理子²・黒木信一郎²・濱中大介²

¹ 九州大学大学院農学研究院 812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

² 九州大学大学院生物資源環境科学府 812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

³ 岐阜大学農学部 501-1193 岐阜市柳戸1-1

Comparison between Fixed and Flexible Chamber Methods for Measuring Respiratory Rate under Steady and Unsteady States

Koichi Akimoto¹, Toshitaka Uchino¹, Kohei Nakano³, Eriko Yasunaga²,
Shinichiro Kuroki² and Daisuke Hamanaka²

¹ Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

² Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University,
6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

³ Faculty of Agriculture, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu 501-1193

Summary

A proposed new method is effective for measuring the respiration rates of fruits and vegetables not only under stable temperature or gas component but under a dynamically changing environment, such as during cultivation in an open field or during transit after harvest. The gaseous components within a flexible plastic film bag, in which the horticultural product or its parts is enclosed, are measured continuously or periodically. The method is called the flexible chamber method for measuring respiration rates. By using fresh air or some component gas initially, and adjusting the ratio of the air volume and that of the reaction product, this method can control the internal gas concentration of the chamber and the turnover rates. In this research, cucumber was used.

A decrease in oxygen concentration from 21 to 8% repressed the respiration rate while increasing the carbon dioxide concentration from the ambient 0.03 to 6%. This respiration repression was caused by the high CO₂ and low O₂ concentrations rather than by the interaction between the two gases.

At 8% oxygen (Fig. 5), the oxygen consumption rate decreased more slowly than did the carbon dioxide emission rate so that the final carbon dioxide concentration approached 5%. Hence, the respiratory quotient (RQ) increased from 1.0 to about 1.5. The oxygen concentrations seem to border the anaerobic respiration phase.

When the pressure in the chamber was increased from the ambient atmospheric pressure, the respiration rate tended to be repressed temporarily which indicates fluctuating pressure may influence the respiration process.

The new proposed method of measuring the respiration rate is adaptable to a diverse environment as mentioned above, especially when the atmospheric pressure is under an unsteady state.

Key Words: anaerobic respiration, cucumber, flexible chamber method, respiration rate, unsteady state.

緒 言

MA包装設計の数学モデルは微小時間当たりのガス移動がガス分圧差に比例することを基礎とするのが一般的であるが、その基礎方程式を解くのに初期条件や境界条

件が定常状態であることを仮定して行うことが多かった。しかし、それでは実際の流通過程に多い非定常過程に適用し難いという問題点があるため、コンピューターを利用した数値解法による方法も検討されてきた。これらの報告では環境変化に対する呼吸反応を検討するのではなく、むしろ呼吸速度が特定の式で表わされると仮定して、MA包装における呼吸やガス濃度のシミュレーションが行われてきた。椎名ら(1988)は呼吸を温度ときざみ野菜

のカット幅の関数とし、しかも O_2 濃度が 0 になるまで呼吸商は 1 と仮定した。また、呼吸を二次の多項式に近似したり (Yang・Chinnan, 1988), フィルムを介したガスの流入と流出がバランスして袋内ガス濃度は定常状態にあると仮定し (Cameron et al., 1989), CO_2 排出速度をアレニウス式や指数関数で表してガス透過を論じた (Exama et al., 1993; Cameron et al., 1994; Talasila・Cameron, 1995) 報告がなされた。ところが、実際の流通過程ではこれらの仮定が成立しない場合も多く、推定誤差が大きくなるなどの問題があった。これらに対し山下らは、装置上の工夫によって MA 包装設計を可能にする測定法の装置化を図って高精度測定を可能にした (山下, 1992; 山下ら, 1992) が、装置化に経費がかかる点が問題である。また、密閉法でシミュレーション精度を高めた検討も行われた (Fishman ら, 1996; 徐ら, 1995, 1996; Talasila・Cameron, 1997)。このシミュレーション手法は単にフィルム選択などの包装設計に有用であるばかりでなく、変動するガス濃度や温度などの環境に対する作物の呼吸反応を解析する手段ともなり得る。既に著者らは徐らの方法によりガス変動環境に対するキュウリの呼吸反応を検討した (中野ら, 1998)。ところが、この方法ではフィルム袋を静置する定温器内のガス濃度の評価が適切でない場合や、袋の静置法に起因する可能性のある実験誤差が発生することがあった。そこで、より簡易で再現性を得やすい方法として、ガス透過が無視できるガスバリア性の高いフィルムを用いて呼吸測定を行う方法を導入した (秋元ら, 1998)。本報はキュウ리를供試して O_2 濃度と CO_2 濃度の影響を検討するために、通気式呼吸速度測定と比較して新方法の有効性を実証するとともに、既報のフィルム面を介したガス交換を伴う測定法の誤差発生の可能性を考察し、かつフレキシブル法ではなく固定容器で呼吸測定する場合に生じる恐れのある圧力変化の影響も検討した。このように作物を入れる容器が自在に体積変化することを特徴とするフレキシブル呼吸測定法は、ダイナミックに変化する環境下での作物の呼吸反応を明らかにする測定を常圧で実現でき、露地栽培や流通過程のように変動することの多い環境に対する植物の呼吸反応を測定するのに有効な方法であると考えられる。

材料および方法

材 料

供試フィルムは、呉羽化学工業製のガスバリア性が極めて優れたクレハ・ハイバリアー性フィルム (商品名: ベセーラフィルム) を用いた。アルミニウム蒸着フィルムなど、よりバリア性の高い包材もあるが、曲げなどによる劣化があり、熱溶着の容易さや操作性の点から選択したものである。材料フィルムは、ポリプロピレンとリニア低密度ポリエチレンのフィルムをベセーラフィルムと合わせた OPP//ベセーラ//LLDPE のラミネートフィルムを表面積 300cm^2 程度に製袋して供試した。そのガス透過係数 ($\times 10^{-5}\text{ml}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$) は ASTM D1434-58 法 (高分子学会高分子と吸湿委員会, 1968; 串田ら, 1981) により、 30°C で、 O_2 : 0.109, CO_2 : 0.379, N_2 : 0.037 であり、本研究の範囲で無視できる程度であった。また、ガス透過のあるフィルムとしては厚さ 0.035mm の低密度ポリエチレンフィルムを表面積 300cm^2 程度に製袋して供試した。そのガス透過係数 ($\times 10^{-5}\text{ml}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$) は既報 (徐ら, 1995) により、 30°C で、 O_2 : 1310, CO_2 : 5500, N_2 : 330 であった。供試材料は、生産農家で栽培され、実験当日朝 8 時に適期収穫されたキュウリ 'シャープ 1' である。

方 法

フレキシブル袋のフィルムとして、通気法ではガス透過が無視できる程度にガスバリア性の高いフィルムを用い、フレキシブル密閉法ではそのフィルムの他に低密度ポリエチレンフィルムを用いた。通気法はフレキシブル密閉法におけるガス環境に対応させて比較実験を行った。

実験区は第 1 表に示したように、通気法とフレキシブル密閉法とし、通気法は O_2 減少区と CO_2 増加区を設けた。フレキシブル密閉法 A はフィルム面を介したガス透過が無視できる区で、大気圧の対照区と袋内圧力を加圧する区とした。フレキシブル密閉法 B は、フィルム面を介してガス透過のある区である。通気法は供給ガス濃度を調整し、 O_2 を 1 回 2~4% ずつ減少させ 31 時間で大気の 21% から 3% 程度にする区と CO_2 を 1 回 2~5% ずつ増加させ大気の 0% から 20% 程度にする区を設けた。

フレキシブル区及び通気区の各実験区とも実験温度は

Table 1. Experimental conditions.

Measurement methods	Environmental conditions around product		
	O_2	CO_2	Pressure
Flexible chamber method A using almost non-permeable film	(a) natural decrease	natural increase	atmospheric p.
	(b) "	"	pressurization
Flexible chamber method B using permeable film	(c) "	"	atmospheric p.
Flow-through method	(d) 21 $\rightarrow$ 3% slight decrease	0% 0 $\rightarrow$ 20%	atmospheric p. "

30℃で、第1表の(a), (b), (d)の実験区はキュウリ果実を2本ずつ供試し、第1表の(c)は実験の都合から6本を供試した。経時的にO₂, CO₂, N₂濃度を測定して呼吸速度を算出した。ガスは1時間毎に1.0 mlのマイクロシリンジで0.2 ml採取し、ガスクロマトグラフで測定した。検出器はTCD, 検出器温度は100℃で、カラムはモレキュラシーブ5AとポラパックQの並列カラム, キャリアガスはヘリウムである。

通気法による呼吸速度計測

第1図に通気法による呼吸速度測定装置の模式図を示した。試料は容積5.6 lの試料室の中に入れ、空気は左から右に流れる。吸排気用エアープンプは定電圧電源により安定運転を行い、流量調節器により試料前後に配置したマノメーターの指示を指標に圧力を大気圧程度に維持して運転を行うことができる。経時的に変化させる供給ガス濃度は流量調節バルブを調整して行い、また空気は湿度調整器とらせん状銅パイプによって飽和湿度に調湿して供給した。流量は予め流量確認用ビンの中で発生する気泡と流量の関係を求めておいて約100 ml・min⁻¹で連続通気した。呼吸速度は試料室前後の空気を同時に採取してO₂, CO₂濃度を測定し、次式により算出した。

呼吸速度 (ml・hr⁻¹・kg⁻¹) =

$$\frac{\text{試料室前後の濃度差(\%)/100} \times \text{流量(ml} \cdot \text{hr}^{-1})}{\text{試料質量(kg)}} \quad (1)$$

フレキシブル密閉法による呼吸速度計測

この方法による呼吸速度の計算には初期袋内空気体積が必要である。ここでは試料を供試フィルム袋にヒートシール密封後、袋内を脱気し空気を所定量注入した。封入空気は全袋体積の半分程度を目安にして袋がたるむよ

うにした。

呼吸速度の計算は、包装内外でフィルム面を介してガスが透過する場合については、既報の方法(徐ら, 1995, 1996; 秋元・前澤, 1997)により、ガス透過が無視できるフィルムを用いた場合は次の新しい計算原理によった。

i時間の空気体積はt時間後には呼吸によるO₂消費とCO₂排出によって体積変化するので次式が成り立つ。

$$VT_i = VS_i + VA_i$$

$$VA_{i+t} = VA_i + \Delta VO_{i+t} + \Delta VC_{i+t} \quad (2)$$

i時間からi+t時間のO₂変化量とCO₂変化量に着目すると

$$\Delta VO_{i+t} = VO_{i+t} - VO_i = VA_{i+t} \frac{MO_{i+t}}{100} - VA_i \frac{MO_i}{100} \quad (3)$$

$$\Delta VC_{i+t} = VC_{i+t} - VC_i = VA_{i+t} \frac{MC_{i+t}}{100} - VA_i \frac{MC_i}{100}$$

上記3式を整理すると

$$VA_{i+t} = VA_i + (VA_{i+t} \frac{MO_{i+t}}{100} - VA_i \frac{MO_i}{100}) \quad (4)$$

$$+ (VA_{i+t} \frac{MC_{i+t}}{100} - VA_i \frac{MC_i}{100})$$

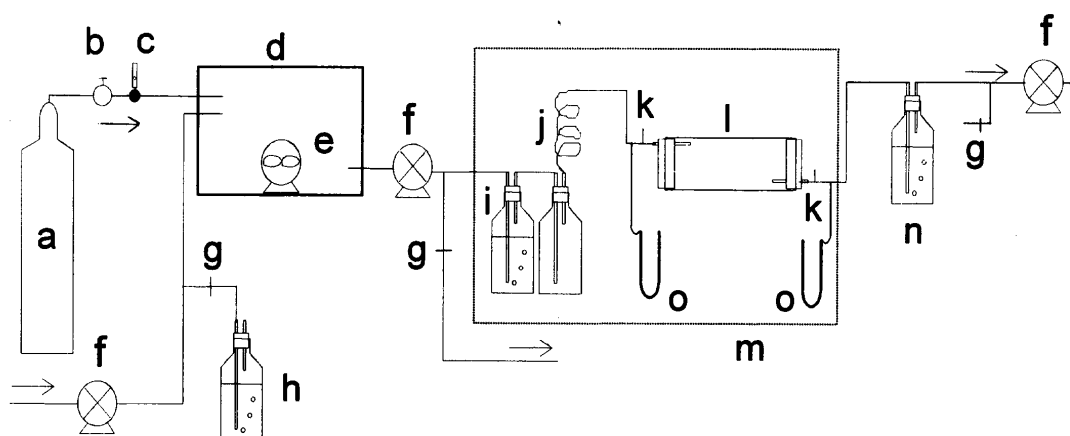
$$= VA_i - \frac{VA_i}{100} (MO_i + MC_i)$$

$$+ \frac{VA_{i+t}}{100} (MO_{i+t} + MC_{i+t})$$

さらに整理すると

$$VA_{i+t} = \frac{100 - MO_i - MC_i}{100 - MO_{i+t} - MC_{i+t}} VA_i \quad (5)$$

また、CO₂排出速度、O₂消費速度および呼吸商は



a: gas cylinder, b: valve for flux adjustment, c: flow meter,
d: box for gas mixture, e: fan, f: air pump, g: pinch cock,
h: bottle for exhaust, i: humidity controller, j: spiral copper pipe,
k: gas sampling part, l: sample chamber, m: incubator,
n: bottle for flux confirmation o: manometer

Fig. 1. Schematic of apparatus for measuring respiration by flow-through method.

$$R_c = \frac{\Delta VC}{W_t} \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}, \quad R_o = \frac{\Delta VO}{W_t} \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1} \quad (6)$$

$$RQ = R_c / R_o = \Delta VC / \Delta VO \quad (7)$$

VA: Volume of air in pouch, ΔV : Differential volume between volume at time i and at time $i+t$, VO: Oxygen volume, VC: Carbon dioxide volume, W: Sample weight, t: Time, i : Suffix expressed time i , $i+t$: Suffix expressed time $i+t$, MO: Oxygen concentration, MC: Carbon dioxide concentration.

これらを用いて計算する手順は次の通りである。

- ① 初期の袋内空気体積, O_2 , CO_2 の濃度, 一定時間後の O_2 , CO_2 の濃度を測定により求めて, これを (5) 式に入れ, この一定時間後の袋内空気体積を求める. この作業を順次行っていくため袋内空気体積は初期のみを求めれば以後の値は計算によって求められる. すなわち, i 時の空気体積を VA_i , その時の O_2 , CO_2 濃度を MO_i , MC_i とし, それから t 時間後の O_2 , CO_2 濃度を MO_{i+t} , MC_{i+t} として (5) 式に代入して, t 時間後の空気体積 VA_{i+t} を求める.
- ② 算出された値を (3) 式に代入すれば, i 時間から $i+t$ 時間における O_2 変化量と CO_2 変化量を得ることが出来る.
- ③ 以上の手順により得られた値を試料質量 W とともに (6) 式に代入すれば, 呼吸速度が得られ, 更に (7) 式により呼吸商 RQ も算出される. この計算手順をもとに, 例えば, 表計算とグラフ作成の機能をもつソフトウェア等に簡単に手順を書き込んでおけば, 計測値を入力するだけで直ちに結果が算出される. なお, 測定条件によっては測定値が大きくばらつく場合がある. 当該測定点のみの誤差であることが明らかな場合にはその値を除外し, また, 全体に分布する誤差が問題となる場合には移動平均による平滑化を実施する.

結果および考察

O_2 を大気の 21% から段階的に 3% まで減少させた通気実験区の結果を第 2 図に示した. O_2 濃度の減少に対応して O_2 消費速度および CO_2 排出速度とも減少した. O_2 濃度が 8.2% に減少した時点から O_2 消費速度は CO_2 排出速度の低下よりも大きな減少を示し, さらに O_2 濃度が 5% に達してからは排出 CO_2 速度が上昇を始め, O_2 濃度が 3% に減少してもなお上昇を続けた. この現象は呼吸商の変化においても明らかで, O_2 濃度が 8.2% になる以前はほぼ 1.0 を維持していたものが, O_2 濃度が 8.2% になってからは 1.4 に増加した. O_2 濃度が 5% に低下してからは 1.8 まで上昇し, さらに O_2 濃度が 3% に低下してからは急上昇した. この状態変化は嫌気呼吸への移行を示している. これは Kader ら (1986) が, 青果物を貯蔵する場合, O_2 濃度が 1%~3% の環境下で嫌気呼吸を引き起こす可能

性を示唆しているように, O_2 濃度が呼吸に密接に関与していることの現れである. O_2 濃度が 8%, 5%, 3% の各段階でキュウリ果実の呼吸反応に顕著な変化が生じており, 低 O_2 濃度の呼吸に与える影響が明らかである. また O_2 消費速度および CO_2 排出速度とも同じく初期 $52 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ であったが, この値は過去の報告値 (農産物流通技術研究会, 1998) と類似していた.

第 3 図は CO_2 濃度を 0% から段階的に上昇させた通気実験区の結果である. CO_2 濃度を 0% から 20% まで上昇させると, O_2 濃度は 21% から 16.6% まで減少した. ガス濃度の変化に伴って段階的に O_2 消費速度と CO_2 排出速度がともに低下することは第 2 図に示した O_2 濃度のみが減少した場合と同様である. ガス濃度の変化と呼吸速度の変化を第 2 図と第 3 図で比較すると, O_2 濃度の減少も CO_2 濃度の増加も共に独立して呼吸を低下させる効果があったといえる.

第 2 図で明らかになった低 O_2 濃度の呼吸抑制効果については, 多くの報告と一致している (久保ら, 1990; 壇ら, 1995a, b; 中野ら, 1998). 一方, 第 3 図の結果は CO_2 の影響と考えられた. エチレン生成を伴わない青果物の場合, 高濃度 CO_2 が生理障害を引き起こすことがある (Kubo ら, 1989, 1990, 1995; 久保ら, 1996a, b) とされ, 東尾ら (1980) は, レタスやホウレンソウは比較的 CO_2 濃

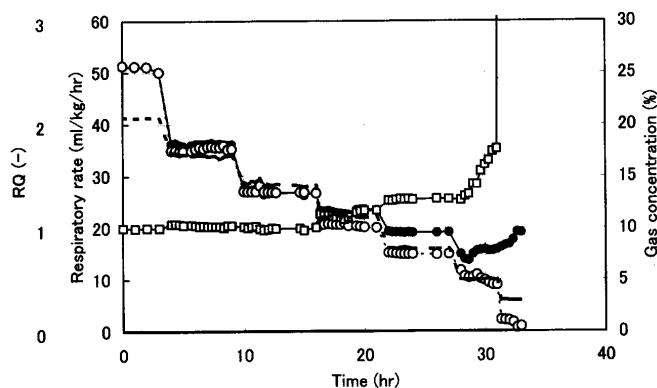


Fig. 2. Effect of decrease of oxygen concentration on respiration in flow-through method.

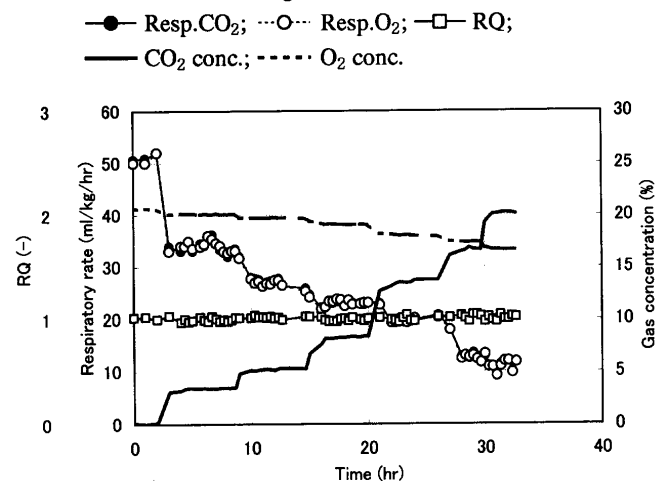


Fig. 3. Effect of increase of carbon dioxide concentration on respiratory rate in flow-through method.

度に対する耐性が低いと報告している。本報の結果では高 CO_2 濃度下で呼吸抑制の効果が認められたものの特別な障害は認められなかったのは、実験期間が34時間と短かったことが原因かも知れない。また Kader ら (1986) によると、青果物の種類により耐性が異なるものの、一般的に CA 貯蔵やフィルム包装貯蔵の場合 10% 以上の CO_2 濃度によって生理障害が生じるとされているが、本報では 10% 以上におかれた時間が 12 時間程度と短かったため、障害発生には至らなかったものと考えられる。 O_2 と CO_2 濃度の影響について第 2 図および第 3 図の結果を比較検討すると、呼吸作用の抑制には O_2 濃度の減少が大きく影響するが、 CO_2 濃度の増大においても類似の傾向が認められたが、呼吸抑制は両方のガスの作用と言うよりも、一方のガス濃度に支配されるのではないかと考えられる。

第 4 図は第 1 表 (a) による結果である。 O_2 濃度は 21% から減少し 34 時間後に 3.0% に、 CO_2 は 0% から 18.9% に増加した。このガス濃度の変化は第 2 図と第 3 図の結果を併せた状態である。 O_2 濃度の減少が 21% から 3% になっているが、初期の O_2 消費速度 $41.2\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 、 CO_2 排出速度 $42.7\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ が O_2 濃度減少と CO_2 濃度増加に伴って、17 時間経過後の O_2 濃度が 8.4% 程度までは、 O_2 消費速度が $15.5\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 、 CO_2 排出速度が $19.6\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ へと減少している。この後、更に O_2 濃度が減少すると急速に O_2 消費速度は低下し、 CO_2 排出速度は急増したが、この傾向は第 2 図の O_2 濃度減少による影響と酷似している。 CO_2 濃度も第 3 図のように増加しているものの、30 時間後から O_2 消費速度が低下し CO_2 排出速度が増加している現象は、第 2 図の 30 時間前後の呼吸反応に相当し、 O_2 濃度が 4.2% と低濃度になって呼吸反応に対し支配要因になったためと考えられる。また、 O_2 濃度が 10% を下回るようになってから呼吸商がそれまでの 1 前後から微増する傾向は第 2 図にもみられ、 O_2 濃度の影響であることが分かる。このように第 4 図に示される結果だけでは CO_2 濃度と O_2 濃度の影響を分離できない場合もあるが、その影響の程度は通気法による第 2 図と第 3 図を比較検討することによって明らかにで

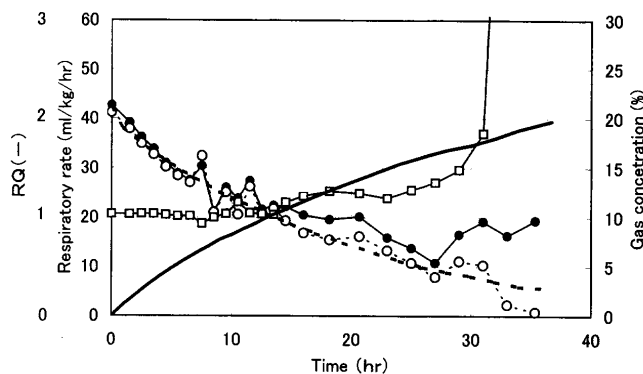


Fig. 4. Changes in respiratory rate by flexible chamber method using almost non-permeable film.

きる。すなわち、ガス透過が無視できるフィルムを用いたフレキシブル密閉法による呼吸速度測定法は通気法により得られる情報よりも効果を分離し難いという限定された情報となるものの、呼吸速度測定のひとつとして妥当性が認められたといえよう。このフレキシブル密閉法は単にフィルム袋を容器とすることで、袋内にガス吸着剤を入れたり袋体積と試料質量比を変えることによりガス濃度変化速度を自由に設定できるなど優れた面がある。

第 5 図は第 1 表 (c) による結果である。 O_2 濃度は 21% から 7 時間後まで急減して 8.3% になり、17 時間後には 5.4% になり、その後は 7.8~8.6% の間で微弱な増減を繰り返した。 CO_2 濃度は 0% から 8 時間で 6.7% に急上昇し、9 時間後から徐々に減少して 76 時間後には 4.2% になっていたのに対し、 O_2 消費速度は初期の $42.3\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ から 7 時間後には $22.2\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ と低下し、最終的に $12.3\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ になった。 CO_2 排出速度は O_2 濃度の減少とともに O_2 消費速度よりやや大きな値で推移し、呼吸商は 1.5 から 1.9 の間を増減した。このように O_2 、 CO_2 の濃度に極端な変化が無いときにでも呼吸商が増加する結果となった。呼吸商が 1 より大きな値となったのは実験開始 3 時間後の O_2 17%, CO_2 2% 前後の時からで、第 2 図および第 4 図の場合と比較すると若干早かった。これは定温器内の CO_2 濃度が高まった結果、計算原理上、呼吸による CO_2 排出速度を過大に評価してしまったことが原因と考えられる。このことは、ファンにより、袋を静置した定温器の連続換気を行って袋周囲の CO_2 蓄積が生じにくいように注意して測定を行ったところ、呼吸商がほぼ 1 を推移するようになった結果から推察される (データ省略)。著者らの行った既報 (秋元ら, 1997; 中野ら, 1998) では、強制換気ファンを装備した装置であったのに対し、本報で使用した装置はファンを装備しておらず換気が不十分であったものと考えられる。この状態での測定では、フィルム面を介して透過移動するガスの速度推定に誤差を生じ易く、結果として呼吸の推定に誤差を持ち込んでしまうという欠点があり、実験に当たっては十分な注意が必要である。すなわちフィルム袋を静置しておく場合の底面を網棚にする等の工夫は

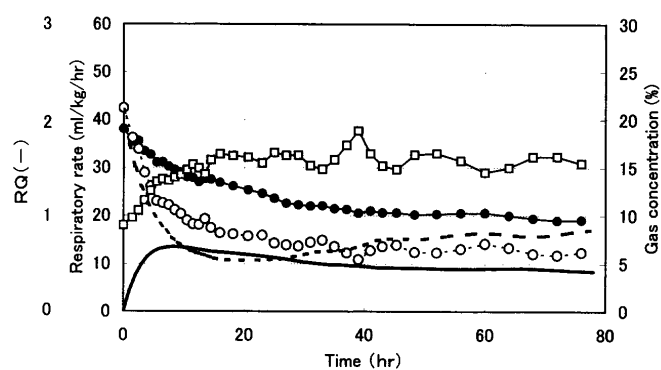


Fig. 5. Changes in respiratory rate by flexible chamber method using permeable film.

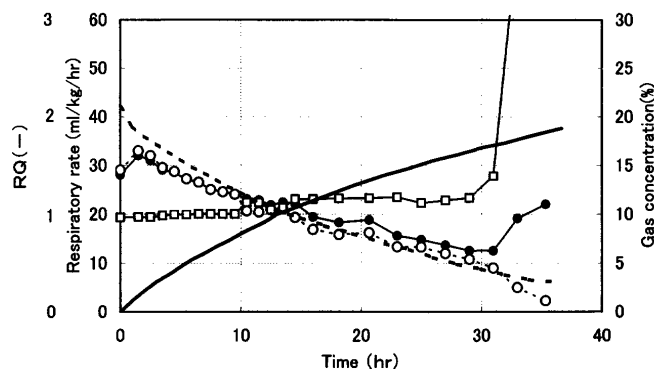


Fig. 6. Changes in respiratory rate by a pressurized flexible chamber method.

勿論であるが、十分な連続換気を行うことによって袋周囲にガス蓄積が生じないように注意しなければならない。

第1表(b)による結果を第6図に示した。この第6図と第4図の違いは袋内全圧の違いによる。圧力はキュウリ果実と空気の入った袋に2 kgの加重をかけることによる。第6図と第4図を比較すると、加圧区のO₂濃度減少の速度とCO₂濃度増加の速度がやや遅く、また加圧区の初期に一度呼吸速度が増加してから減少するという特徴がある。これ以外の差異はほとんど認められない。加圧や圧力変動による呼吸への影響についての報告は見出せないが、圧力が変化した初期の段階については、測定の開始と同時に袋内空気が加圧され、この時、キュウリ果実の細胞間隙内のガスが加圧された分、細胞内に溶け込んでガス交換が妨げられたためではないかと考えられる。この初期加圧の影響が安定するに従ってガス交換は正常に戻ったものの、初期のガス交換の低下がその後のガス濃度の変化速度にやや遅れが生じた原因になったのではないかと考えられる。加圧による影響は明らかでないが、減圧下における効果は作物内のエチレンが除去されることと酸素分圧が低くなることで一種のCA効果が生じることが原因とする考えがある(樽谷・北川, 1992)。減圧貯蔵は貯蔵期間を数倍長くすることが明らかになっているだけに、圧力の変化が発生したもとの呼吸には大気圧下での呼吸と差異が存在することが十分考えられ、今後、詳細な検討が必要である。

摘 要

作物を軟質プラスチックフィルム袋に入れ、袋内のガス濃度測定を連続あるいは任意時間毎に行って呼吸速度を計測する方法は、定温でガス濃度一定のような定常条件ばかりでなく、大気圧のもとでダイナミックに変化する環境下での作物の呼吸反応を明らかにできる測定法と考えられる。従ってこの方法は、流通過程のように変動することの多い環境に対する植物の呼吸反応を測定するのに有効である。本報ではこれをフレキシブル呼吸速度測定法と名付け、ガス透過のあるフィルムを用いる測定法の問題点を示し、これを解決するためにガス透過が

無視できるフィルムを用いた測定法の有効性について検討した。実験にはキュウリ「シャープ1」を供試した。

呼吸作用の抑制にはO₂濃度の減少が大きく影響するが、CO₂濃度の増大においても類似の傾向が認められ、また呼吸抑制は両方のガスの作用と言うよりも、一方の優勢なガス濃度に支配される傾向があった。

O₂濃度が8%に低下するとO₂消費速度はCO₂排出速度より低下し、5%まで低下するとそれまで低下していたCO₂排出速度は増加に転じ、3%では急上昇して呼吸商も増大した。このO₂濃度値が嫌気呼吸発生の閾値と考えられた。

大気圧から加圧状態になった時に呼吸は一時抑制される傾向があり、変動圧力の呼吸への影響が示唆された。

ガス透過が無視できるフィルムを用いたフレキシブル呼吸速度測定法は、厳密に制御された通気法による測定結果と同等の結果となり、環境に対する非定常過程の作物の呼吸反応をよく表すことが実証された。

謝 辞 本研究を推進するにあたり、呉羽工業株式会社にはフィルムを提供していただき、種々ご配慮を賜った。記して謝意を表します。

引用文献

- 秋元浩一・前澤重禮. 1997. フィルム包装された青果物の呼吸速度推定. 農機誌. 59: 109–116.
- 秋元浩一・胡 文忠・安永円理子・中野浩平. 1998. 動的ガス環境下における呼吸速度の簡易測定法. 園学雑誌. 67(別2): 486.
- Cameron, A. C., R. M. Besudry, N. H. Banks, M. V. Yelanich, 1994. Modified atmosphere packaging of blueberry fruit: Modeling respiration and package oxygen partial pressures as a function of temperature. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 119: 534–539.
- Cameron, A. C., W. Boylan-Pett, J. Lee. 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: Modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. J. Food Sci. 54: 1413–1416, 1421.
- 壇 和弘・永田雅靖・山下市二. 1995a. 数種野菜の呼吸に及ぼす低酸素の影響. 日食低温誌. 21: 3–8.
- 壇 和弘・永田雅靖・山下市二. 1995b. 数種野菜の呼吸に及ぼす低酸素の影響(II). 日食低温誌. 21: 127–132.
- Exama, A., J. Arul, R. W. Lencki, L. Z. Lee, C. Toupin. 1993. Suitability of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. J. Food Sci. 58: 1365–1370.
- Fishman, S., V. Rodov, J. Peretz and Ben-Yehoshua. 1996. Model for gas exchange dynamics in modified-atmosphere packages of fruits and vegetables. J. Food Science. 60: 1078–1083, 1087.
- 東尾久雄・南出隆久・緒方邦安. 1980. 高濃度炭酸ガス短時

- 間処理による青果物の品質保持効果. 日食工誌. 27: 192-198.
- 徐 歩前, 秋元浩一, 前澤重禮. 1995. 非定常状態のフィルム包装におけるガス濃度変化のシミュレーションモデル. 日食低温誌. 21: 211-216.
- 徐 歩前・秋元浩一・前澤重禮. 1996. 非定常状態におけるMA包装された青果物の呼吸速度の推定法. 日食低温誌. 22: 11-16.
- Kader, A. A. 1986. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables, *Food Technol.* 5: 99-104.
- 高分子学会高分子と吸湿委員会. 1968. 材料と水分ハンドブック. p.210-211. 共立出版株式会社. 東京.
- 久保康隆・平田 治・稲葉昭次・中村怜之輔. 1996a. 高濃度炭酸ガス環境下での青果物の呼吸活性とエチレン生成-処理温度と炭酸ガス濃度の影響-. 園学雑. 65: 403-408.
- 久保康隆・埴田和宏・稲葉昭次・中村怜之輔. 1996b. 高濃度炭酸ガスがモモおよびトマト果実のエチレン生成成におよぼす影響. 園学雑. 65: 409-415.
- Kubo, Y., A. Inaba and R. Nakamura. 1989. Effects of high CO₂ on respiration in various crops. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 58: 731-736.
- Kubo, Y., A. Inaba, R. Nakamura. 1990. Respiration and C₂H₄ production in various harvested crops held in CO₂-enriched atmospheres. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115: 975-978.
- 久保康隆・稲葉昭次・喜安英伸・中村怜之輔. 1990. 高濃度炭酸ガスと低濃度酸素条件が青果物の呼吸活性に及ぼす影響. 岡山大農学報. 73: 27-33.
- Kubo, Y., Y. Yamashita, T. Ono, F. M. Mathooko, H. Imaseki, A. Inaba 1995. Regulation by CO₂ of wound-induced ACC synthase gene expression in mesocarp tissue of winter squash. *Acta Hort.* 394: 219-226.
- 串田秀男・池尻文利・小玉真一郎. 1981. 包装資材. プラスチック標準試験方法研究会編. プラスチック実用試験ハンドブック. p.411. 工業調査会, 東京.
- 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: 31-36.
- 農産物流通技術研究会. 1998. 1998年度版農産物流通技術年報. p.202. 流通システム研究センター. 東京.
- 椎名(小野寺)武夫・河野澄夫・岩元睦夫. 1988. シミュレーションモデルによるカット野菜包装における内部ガス組成の解析. 園学雑. 56: 486-492.
- Talasila, P.C., A. C. Cameron. 1995. Free volume changes in modified atmosphere packages containing fresh produce: Measurement and control. *HortScience.* 30: 817.
- Talasila, P. C., A. C. Cameron. 1997. Free-volume changes in flexible, hermetic packages containing respiring produce. *J. Food Sci.* 62: 659-664.
- 樽谷隆之・北川 博. 1992. 園芸食品の流通・貯蔵・加工. p.159. 養賢堂. 東京.
- 山下市二. 1992. CA貯蔵の新技术動向とMASCA. 日食低温誌. 18: 24-29.
- 山下市二・渡辺和幸・妹尾良夫・河合正毅. 1992. 修整空気システム CA貯蔵装置の改良・自動化. 日食低温誌. 18: 18-23.
- Yang, C. C., M. S. Chinnan. 1988. Modeling the effect of O₂ and CO₂ on respiration and quality of stored tomatoes. *Trans ASAE.* 31: 920-925.