

一般論文

MA (Modified Atmosphere) 包装ブロッコリーの呼吸評価

石川豊* 佐藤博実* 石谷孝佑** 平田孝*

Evaluation of broccoli respiration rate in modified atmosphere packaging

Yutaka ISHIKAWA*, Hiromi SATO*, Takasuke ISHITANI**, Takashi HIRATA*

A mathematical method was examined for continuous determination of the respiration of broccoli stored under modified atmospheric conditions. Broccoli (ca. 250g) was packaged in different plastic films (oxygen permeability: 1,560 to 7,640 ml/m²·day·atm at 15°C) and stored for 5 days at 15°C. Gas concentrations in the packaging were periodically analyzed by gas chromatography. Mathematical equations were developed for calculating the void volume of the package at any given time as a function of nitrogen concentration of the in-package atmosphere. The calculated volumes gave a close approximation to the actual volumes. The procedure to calculate the periodical changes in the volume and the oxygen or carbon dioxide concentration was combined with a gas permeation model through films to obtain the respiration rates of broccoli packaged with gas permeable films. The total procedure presented here permits evaluation of the respiration of broccoli without unsealing the packages. The respiration rates and modified atmospheres analyzed by this approach were discussed for optimizing packaging conditions for the produce.

Keywords: MA, Polymer films, Respiration, Broccoli, *Brassica oleracea*, Modified atmosphere, Mathematical models, Vegetables, Fresh produces

MA 包装したブロッコリーの呼吸速度を包装袋を未開封のまま連続的に測定する手法について検討した。約250gのブロッコリーを酸素透過度1560~7640ml/m²·day·atm (15°C) のフィルム袋に包装し、15°Cで5日間貯蔵した。包装袋内のガス濃度を経時的にガスクロマトグラフで分析した。窒素濃度の関数として袋内空容積を表わす数式モデルを開発し、モデルから求めた容積と実測値を比較したところ良く一致した。空容積の経時変化、酸素あるいは二酸化炭素濃度の経時変化とフィルムのガス透過モデルを組み合わせてガス透過性の高いフィルムで包装したブロッコリーの呼吸速度を連続的に測定することができた。本法で求めた呼吸速度と包装袋内ガス組成からブロッコリーの適正包装設計について検討した。

キーワード: MA 包装、フィルム、呼吸、ブロッコリー、数学モデル、野菜、青果物

* 農林水産省 食品総合研究所 (〒305 茨城県つくば市観音台2-1-2): National Food Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305 ** 農林水産省 農業研究センター (〒305 茨城県つくば市観音台3-1-1): National Agriculture Research Center, Tsukuba, Ibaraki 305

1. 諸言

青果物の鮮度保持のためには、適切な温湿度条件の維持とともに、貯蔵・流通中のガス環境のコントロールが極めて重要である。鮮度保持に適切なガス環境を得る手段としてCA (Controlled Atmosphere) 貯蔵やMA (Modified Atmosphere) 包装が検討されてきた^{1)~3)}。中でもMA包装は、特別な装置を必要とせず簡易に適切なガス環境を得ることができるため広く利用されつつある。しかし、MA包装では、青果物の呼吸速度と包装材料のガス透過性によりガス環境が決定されるので、適切な呼吸速度の評価を精度よく行う必要がある。

MA包装の設計を行うための呼吸測定法には、1) ガス遮断性の高い金属^{4) 5)}あるいはガラス⁶⁾、プラスチック容器⁷⁾に青果物を密閉して内部のガス濃度変化を測定する、2) ガス遮断性の高い容器に青果物を入れ、一定組成のガスを連続してフローし、出口のガス組成を測定する^{8)~10)}等がある。前者は簡易な方法であるが、密閉容器を用いるため測定中に初発のガス組成は変化する。後者ではガス濃度変化を高精度に検知できる特別な装置が必要となる。一方、適切なMA包装設計を行うためには、包装袋内における呼吸速度を評価することも重要である。しかし、これらの目的

を特別な装置を用いず簡易に達成するための報告はほとんどない。

本報の目的は、MA包装した青果物（ブロッコリー）の呼吸速度を包装袋を未開封のまま連続的に評価する手法を開発すること、および連続評価によってMA包装設計の適否を判断できることを示すことである。

2. 実験方法

2.1 包装フィルム

供試した包装フィルムの表面積、厚み、15℃におけるガス透過度をTable 1に示した。ガス透過度は、Gasperm-100 (日本分光) で測定した。

2.2 ブロッコリー

ブロッコリーは茨城県内の農家から直接購入した。収穫後、直ちに研究室に運び、15℃、相対湿度90%で保管した。

2.3 包装と貯蔵

12時間保管した約200~300gのブロッコリー14個を1個ずつ各包装フィルムで包装して熱シールで密封した。包装袋の全容積はパンの体積を測定する体積計 (ボルメーター) で測定した。全容積からブロッコリーの体積を差し引いたものを袋内の空容積 (ヘッドス

Table 1 Packaging conditions of broccoli

Condition	Film	Thickness (μ)	Film Permeability (cc/m ² ·day·atm)			Pouch		Broccoli Weight (kg)
			Nitrogen	Oxygen	Carbon dioxide	Surface area (m ²)	Void volume (cm ³)	
1	Polyethylene	36	1010	2780	11000	0.1194	2208	0.242
2	Polypropylene	24	390	1560	3390	0.1219	1910	0.215
3	Polyethylene	20	2150	7640	33900	0.0836	1463	0.287

ペース)とした。容積測定後、直ちに15℃、相対湿度90%の保管室で貯蔵した。14袋のうち典型的な結果が得られた3袋について、空容積、ブロッコリーの重さ等の条件をTable 1に示した。

2.4 袋内ガス濃度の測定

約1mlのヘッドスペースガスを包装袋から抜き取り、ガスクロマトグラフ(島津GC3AH)で、酸素、二酸化炭素、窒素濃度を経時的に分析した。ガスの分離にはモレキュラシーブと活性炭の平行カラムを用い¹¹⁾、熱伝導度検出器で検出した。ヘリウムをキャリアガスとし、各ガスに対する熱伝導度検出器の相対モル感度は窒素100、二酸化炭素115.9、酸素94.3、アルゴン107.0とした¹²⁾。ガスクロマトグラム上の各ガスピークの相対面積よりガス濃度を求めた。本条件では、酸素とアルゴンは分離できないので、ヘッドスペース中には0.93%のアルゴンが常に存在しているものとして、酸素濃度の補正を行った。

2.5 ガラス容器による呼吸の測定

約200gのブロッコリーを内容積約1800cm³のガラス容器に密封し、15℃で2時間放置した。1時間後と2時間後に容器内の酸素と二酸化炭素濃度をガスクロマトグラフで測定し、1時間当たりの酸素消費量、二酸化炭素生成量を求め呼吸速度(cc/h・kg)とした。

2.6 計算

計算は全て、PC9801RA(日本電気)を用いてBASICプログラムにより行った。

3. 理論

一定温度で貯蔵したブロッコリーの包装系内では呼吸により酸素が消費され、二酸化炭素が生成する。酸素消費により系内の酸素分圧は低下するが、同時に包装系外よりフィルムを通して酸素が透過してくる。逆に生成した二酸化炭素は系外に放出される。すなわち、包装系内の酸素と二酸化炭素濃度の変化はブロッコリーの呼吸速度と包装フィルムのガス透過度により決定される。このことは、逆に包装系内の酸素と二酸化炭素濃度の変化、および包装フィルムのガス透過度を評価することによりブロッコリーの呼吸速度を推定できる可能性を示している。

単位時間に包装袋内に透過してくる酸素の量(F_{O_2})はFickの法則により、

$$F_{O_2} = K_{O_2}A(0.21 - P_{O_2}) \dots\dots\dots (1)$$

同様に包装系外へ放出される二酸化炭素の量(F_{CO_2})は

$$F_{CO_2} = -K_{CO_2}AP_{CO_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- K_{O_2} : 酸素透過度 (cc/m²・day・atm)
- K_{CO_2} : 二酸化炭素透過度 (cc/m²・day・atm)
- A : 包装袋の表面積 (m²)
- P_{O_2} : 包装袋内の酸素分圧
- P_{CO_2} : 包装袋内の二酸化炭素分圧

また、供試ブロッコリーの呼吸により単位時間あたりに消費される酸素の量(R_{O_2})は、

$$R_{O_2} = B_{O_2} \cdot W \dots\dots\dots (3)$$

同時に生成する二酸化炭素の量(R_{CO_2})は、

$$R_{CO_2} = B_{CO_2} \cdot W \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- B_{O_2} : 単位重量当りの酸素消費量
(cc/day · kg)
- B_{CO_2} : 単位重量当りの二酸化炭素生成量
(cc/day · kg)
- W : ブロッコリーの重さ (kg)

したがって、袋内における酸素量の変化速度 dV_{O_2}/dt は、

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = K_{O_2}A (0.21 - P_{O_2}) - B_{O_2} \cdot W \dots\dots (5)$$

同様に二酸化炭素量の変化速度 dV_{CO_2}/dt は、

$$\frac{dV_{CO_2}}{dt} = -K_{CO_2}A P_{CO_2} + B_{CO_2} \cdot W \dots\dots (6)$$

ここで、

- V_{O_2} : 袋内酸素量、
- V_{CO_2} : 袋内二酸化炭素量
- t : 貯蔵期間 (日)

一方、 t 日後における包装袋内の空容積を V (cc) とすると、(7) 式が得られる。

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = \frac{dP_{O_2}V}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

同様に、

$$\frac{dV_{CO_2}}{dt} = \frac{dP_{CO_2}V}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

よって、

$$B_{O_2} = \left\{ K_{O_2}A (0.21 - P_{O_2}) - \frac{dP_{O_2}V}{dt} \right\} / W \dots\dots\dots (9)$$

$$B_{CO_2} = \left(\frac{dP_{CO_2}V}{dt} + K_{CO_2}A P_{CO_2} \right) / W \dots\dots\dots (10)$$

P_{O_2} と P_{CO_2} はガスクロマトグラフにより、 V はボルメーターにより経時的に容易に測定でき、それぞれを t の関数として表し、次の (11) ~ (13) 式を得る。

$$P_{O_2} = f(t) \dots\dots\dots (11)$$

$$P_{CO_2} = g(t) \dots\dots\dots (12)$$

$$V = h(t) \dots\dots\dots (13)$$

よって、

$$\frac{dV_{O_2}}{dt} = \frac{df(t) \cdot h(t)}{dt} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{dV_{CO_2}}{dt} = \frac{dg(t) \cdot h(t)}{dt} \dots\dots\dots (15)$$

したがって、(14)、(15) 式を (5)、(6) 式に代入することにより任意の時間における B_{O_2} 、 B_{CO_2} を求めることができる。

空容積の経時変化はボルメーターにより測定してもよいが、初発値のみを測定すれば、包装系内の窒素濃度から以下のようにして求めることができる。すなわち、 t 日後における袋内窒素量 V_{N_2} (cc) は、 t 日間ににおける袋内窒素量の増減に初発窒素量を加えたものである。

$$V_{N_2} = 0.78V_0 + K_{N_2}A \int_0^t (0.78 - P_{N_2}) dt \dots\dots\dots (16)$$

ここで、

- V_0 : 初発空容積 (cc)
- K_{N_2} : 窒素透過度 (cc/m² · day · atm)
- P_{N_2} : 包装系内の窒素分圧

V_{N_2} はまた、 t 日後における窒素分圧 P_{N_2} と空容積 V の積である。したがって、

$$Vn_2 = Pn_2 \cdot V \text{----- (17)}$$

(16)、(17) 式より

$$V = h(t) = \frac{0.78V_0 + Kn_2A \int_0^t (0.78 - Pn_2) dt}{Pn_2} \text{----- (18)}$$

(5)、(6)、(14)、(15)、(18) 式より、初発空容積と酸素、二酸化炭素、窒素濃度変化を経時的に測定することにより、任意の時間における酸素吸収速度、二酸化炭素生成速度を求めることができると考えられる。

4. 結果

4.1 ガス濃度変化

3種類のフィルムでブロッコリーを包装し、15°Cにおける包装内ガス濃度の変化を経時的に測定した結果をFig. 1に示した。条件1、2

では貯蔵5日目でもガス濃度変化が認められたが、条件3においては貯蔵2日目よりほぼ平衡した。包装条件により袋内ガス濃度の経時変化は異なったが、次に示す一種類のモデルに全ての結果を適切にあてはめることができた。

$$P_{ij} = a \exp(bt) + c \exp(dt) + et + f \text{----- (19)}$$

ここで、

P_{ij} : 袋内ガス濃度
($i = 1 \sim 3$: 条件1~3, $j = 1$: 窒素, $j = 2$: 酸素, $j = 3$: 二酸化炭素)

a, b, c, d, e, f : 定数

Fig. 1の実線は(19)式により当てはめた曲線を示している。

Table 2に示したように、各条件におけるガス濃度変化曲線のRMSE (Root Mean Square Error) は十分に小さく、選択した曲線は適切であると考えられる。

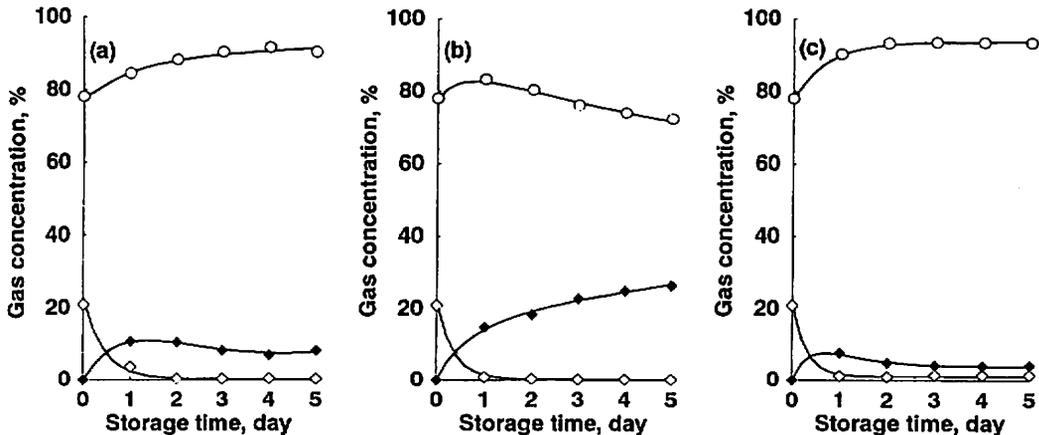


Fig. 1 Changes in nitrogen, oxygen and carbon dioxide concentrations within packages of broccoli at 15°C

(a): Condition 1 in Table 1, (b): condition 2 in Table 1, (c) Condition 3 in Table 1
 Nitrogen : ○ Experimental value, — The best fit line
 Oxygen : ◇ Experimental value, — The best fit line
 Carbon dioxide: ◆ Experimental value, — The best fit line

Table 2 Parameters of equations expressing gas concentrations in package systems for broccoli

Condition	Gas	P _{i,j}	Parameters of equation (19)						RMSE*	R ²
			a	b	c	d	e	f		
1	N ₂	P ₁₁	-11.20	-1.00	0.96	-89.28	-0.67	88.20	0.01	0.979
	O ₂	P ₁₂	22.44	-2.29	—	—	—	0.23	0.38	0.995
	CO ₂	P ₁₃	-45.01	-1.07	55.15	-0.49	2.74	-10.34	2.60	0.989
2	N ₂	P ₂₁	-9.81	-2.18	34.55	-0.13	—	53.19	0.01	0.978
	O ₂	P ₂₂	21.65	-2.83	—	—	—	0.18	0.29	0.999
	CO ₂	P ₂₃	-14.55	-1.17	-2.05	-5.95	2.05	16.62	0.12	0.996
3	N ₂	P ₃₁	-15.85	-1.45	—	—	—	93.66	0.00	0.999
	O ₂	P ₃₂	20.42	-3.38	—	—	—	1.08	0.29	0.997
	CO ₂	P ₃₃	-23.59	-2.54	19.65	-1.32	—	3.95	0.29	0.992

$$* \text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i - D_i'}{D_i} \right)^2}{n}}$$

Where n : Number of experimental points, D_i : Experimental value, D_i' : Calculated value.

4.2 空容積変化

Table 2の窒素濃度変化曲線を(18)式に代入し、袋の空容積を計算した結果を実測値とともにFig. 2に示した。条件2においては貯蔵初期に減少したが、その後徐々に増加する傾向がみられた。これは二酸化炭素の蓄積

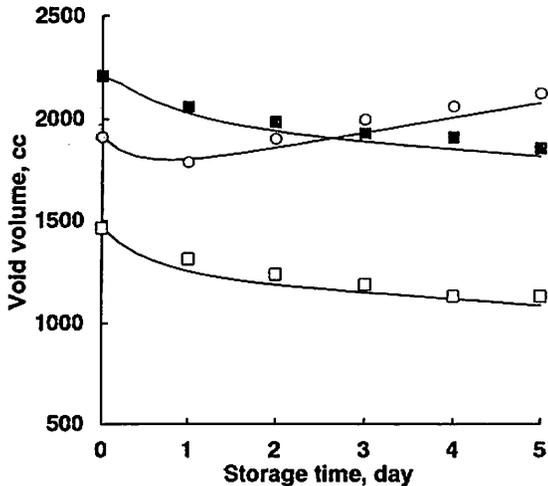


Fig. 2 Experimental and calculated changes in void volumes

Condition 1: ■ Experimental value, — Calculated value
 Condition 2: ○ Experimental value, — Calculated value
 Condition 3: □ Experimental value, — Calculated value

によるものと考えられる (Fig. 1)。条件1、3においては貯蔵期間を通じて減少し、特に2日目以降は直線的に低下した。いずれにしても、実測値と計算値は良く一致したが、このことは(18)式が空容積を求める式として適切であることを示唆するものである。

4.3 袋内ガス量変化

袋内酸素、二酸化炭素量の変化をモデル化するため、ガス濃度の実測値に空容積の実測値を乗じて袋内酸素、二酸化炭素量を求めた。得られた袋内ガス量の変化と最適回帰曲線をFig. 3に示した。これらの曲線も(19)式と同様のモデル((20)式)で表すことができ、Table 3に示したようにそれぞれ適切な定数を選択することができた。

$$V_{i,j} = a \exp(bt) + c \exp(dt) + et + f$$

ここで、 (20)

V_{i,j} : 袋内ガス量
 (i = 1~3 : 条件1~3, j = 2 : 酸素,
 j = 3 : 二酸化炭素)

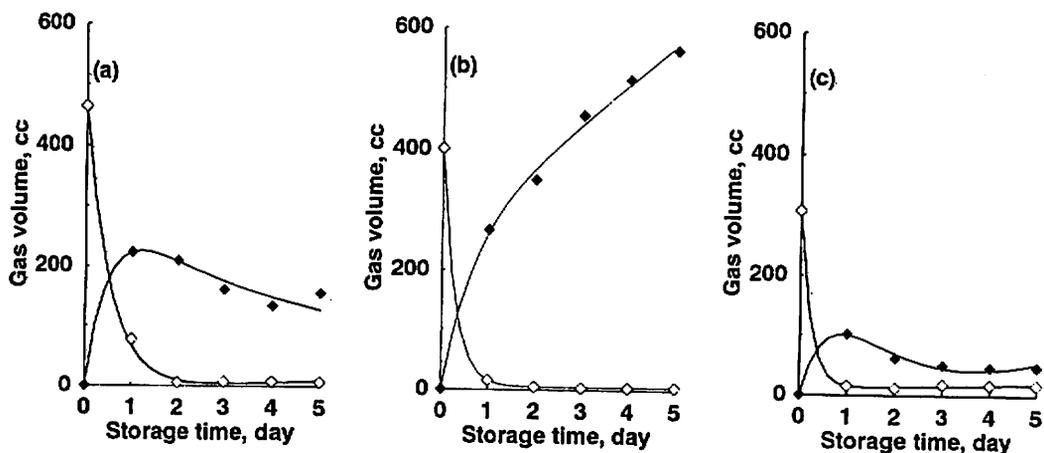


Fig. 3 Changes in oxygen and carbon dioxide volumes within packages of broccoli at 15°C
 (a):Condition 1 in Table 1, (b):Condition 2 in Table1, (c):Condition 3 in Table 1
 Oxygen volume: ◇ Experimental value, — The best fit line
 Carbon dioxide volume: ◆ Experimental value, — The best fit line

Table 3 Parameters of equations expressing gas volumes in package systems for broccoli

Condition	Gas	V _{i1}	Parameters of equation (20)						RMSE*	R ²
			a	b	c	d	e	f		
1	O ₂	V ₁₂	475.70	-1.90	—	—	3.41	-7.87	0.35	0.999
	CO ₂	V ₁₃	-321.22	-2.15	261.04	-0.28	—	62.64	0.89	0.962
2	O ₂	V ₂₂	396.50	-3.57	—	—	-1.10	4.59	0.09	1.000
	CO ₂	V ₂₃	-248.95	-1.52	-1.55	-293.33	64.17	251.77	0.37	0.997
3	O ₂	V ₃₂	297.11	-4.37	—	—	1.68	10.11	0.07	1.000
	CO ₂	V ₃₃	-450.44	-1.47	550.88	-0.69	26.95	-99.73	0.19	0.975

$$* \text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i - D_i'}{D_i} \right)^2}{n}}$$

Where n : Number of experimental points, D_i : Experimental value, D_i' : Calculated value.

4.4 呼吸速度変化

1) 計算値

酸素、二酸化炭素濃度の袋内変化は、(19)式のP₁₂、P₂₂、P₃₂及びP₁₃、P₂₃、P₃₃によってそれぞれ適切に表されている。したがって、これらの式と空容積を求める(18)式を(9)、(10)式に代入することにより任意の時間における呼吸速度(酸素消費量、二酸化炭素生

成量)を計算し(Fig. 4)これを計算値とした。

2) 実測値

ガス量の変化速度はガス量変化曲線を微分することにより得られる。そこで、Table 3の定数を用いた(20)式を時間tで微分して袋内ガス量の変化速度(dV_{O₂}/dt, dV_{CO₂}/dt)を求めた。dV_{O₂}/dt, dV_{CO₂}/dtを(5)式、(6)式の左辺に代入し、呼吸速度(酸素消費

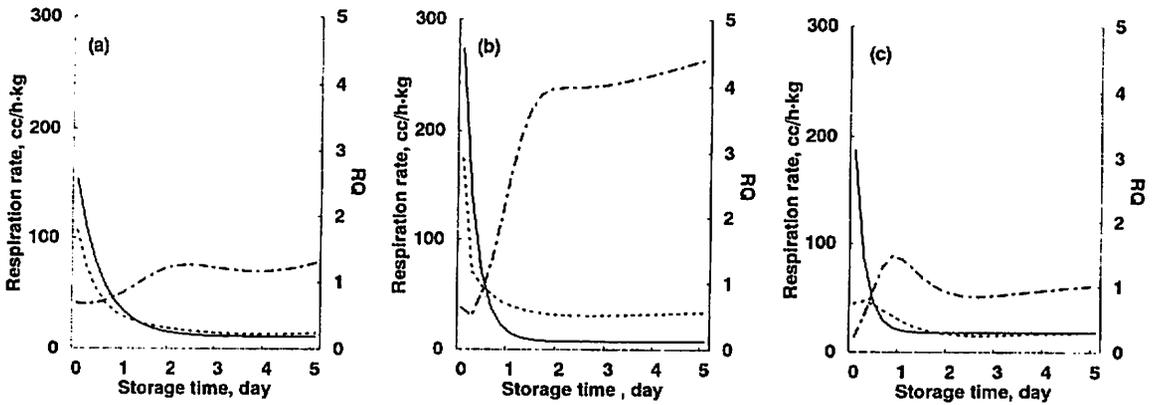


Fig. 4 Respiration rates and respiration quotients of broccoli packaged with different films
 (a):Condition 1 in Table 1, (b):Condition 2 in Table 1, (c):Condition 3 in Table 1
 —Oxygen consumption rate, ---Carbon dioxide production rate, ---Respiration quotient

速度、二酸化炭素生成速度)を求め、これを実測値とした。いずれの実測値も Fig. 4 に示した計算値とほぼ完全に重なった。

4.5 呼吸商変化

Fig. 4 に計算値から得られた呼吸データをもとに呼吸商 (RQ) を求めた結果を示した。条件3では2日目以後RQは約1で推移し、適切な包装設計が行われていることがわかる。しかし、条件2においてはRQは経時的に著しく上昇し、嫌気呼吸が進行していると考えられる。

4.6 測定法による呼吸活性の差

包装袋を開封して中身をガラス容器に移して呼吸を測定した結果と未開封のまま呼吸を測定した結果を比較した。すなわち、条件3と同様のフィルムでブロッコリーを包装して15°Cで貯蔵した。Fig.5は、フィルム包装袋よりブロッコリーを取り出してガラス容器に移し、通常の空気組成下で呼吸を測定した結果と、同一条件のフィルム包装系内における

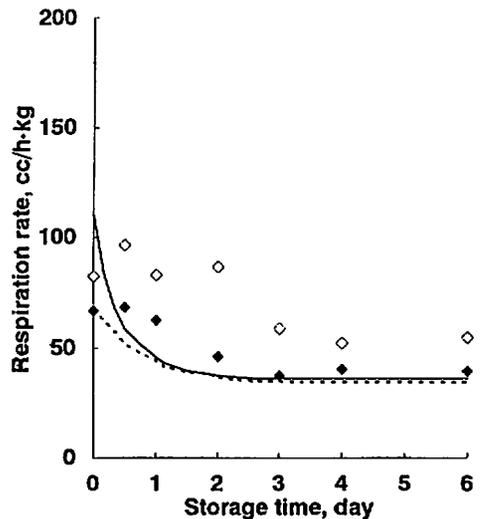


Fig. 5 Respiration rates of broccoli measured by different methods

Oxygen consumption rate:
 — Determined without unsealing packages
 ◇ Determined after unsealing packages
 Carbon dioxide production rate:
 --- Determined without unsealing packages
 ◆ Determined after unsealing packages

呼吸の計算値を比較して示した。フィルム包装は呼吸を著しく抑制している。特に貯蔵2日目までは抑制作用が強く鮮度保持効果が高いことが認められる。2日目以後は空気組成

下においても呼吸活性は低下し、フィルム包装区内の低酸素、高二酸化炭素条件下における呼吸活性との差は徐々に小さくなった。しかし、6日目においても酸素吸収速度は明らかにフィルム包装区において低く、鮮度保持効果が認められた。

5. 考 察

青果物の呼吸速度は、供試青果物をガス透過性のない剛性あるいはフレキシブルな容器に密封し、容器中のガス濃度変化を測定して求めるのが最も一般的である。ガス非透過性容器を用いれば、包装系内の酸素は消費されるのみであるから、単位時間当たりの酸素消費量あるいは二酸化炭素生成量を容易に求めることができる^{4)~10)}。しかし、これらの方法では、MA包装に適した酸素2~5%、二酸化炭素0~10%の条件下¹³⁾における呼吸速度を求めることは困難である。何故ならガス非透過性容器を用いた場合、低酸素下においては二酸化炭素濃度が極めて高くなるからである。このためこれらの方法においては、生成二酸化炭素をアルカリ性物質等で吸収しているが^{4) 5)}、結果として呼吸に与える二酸化炭素の影響を無視することになる。一方、二酸化炭素を含む各種組成のガス環境における呼吸速度は、組成の異なる混合ガスとともに青果物を密封し、ガス濃度変化を評価することによっても求められるが¹⁴⁾、混合ガス供給のために特別な工夫が必要になる。

Fig. 4に示したように、ガス透過性のある包装容器を用いて求めた呼吸速度は酸素濃度のみならず、二酸化炭素濃度の影響をも反映した結果である。本法では、袋の大きさやブ

ロッコリー量をかえることにより、様々なガス環境下における呼吸速度を容易に求めることができるため、十分な精度があれば、有用性は高いと考えられる。

後述するように、短期間の貯蔵においては、一定温湿度下におけるブロッコリーの呼吸速度は雰囲気ガス濃度により決まる。したがって、Fig. 1に示したように、条件3においては、ガス濃度は貯蔵2日目より一定であったことから、呼吸速度も一定になっていると推定される。Fig. 4に示したように、条件1、3の呼吸速度は酸素吸収速度、二酸化炭素生成速度およびRQとも2日目よりほぼ一定で推移した。このことは(5)式、(6)式による呼吸速度の評価が適切であることを示唆するものである。条件2においては、呼吸速度は平衡に到らず、これはRQにおいて明白であった(Fig. 4)。これはガス濃度、特に二酸化炭素濃度が一定にならなかった(Fig.1)ためと考えられる。

呼吸速度の評価には、できるだけ簡易な方法を用いることが望ましい。(5)式、(6)式による呼吸評価は簡易な手法であるが、計算のためには、空容積の情報が必要である。空容積は通常ボルメーターあるいは水浸法¹⁵⁾、一定量の二酸化炭素¹⁶⁾やメタン⁹⁾を容器に注入して濃度変化を見る希釈法等によって経時的に測定しなければならないが、包装系内の酸素と二酸化炭素濃度の変化より空容積変化を求めることができれば極めて有用である。しかし、酸素、二酸化炭素の濃度変化は、青果物の呼吸と包装材料のガス透過度に依存する。したがって、これらの変化より空容積を計算することは困難である。一方、窒素濃度変化は包装材料のガス透過度のみ依存し、

空容積の変化に直接対応すると考えられる。(18)式によれば窒素濃度の変化を利用し、初発容積のみを測定することで空容積を評価することができた。Fig. 2に示したように窒素濃度変化から計算で求めた空容積は実測値とよく一致した。窒素濃度法の検定のために選定した包装条件のうち、条件3はブロッコリーのMA包装に適正であるが、条件1、2は適性条件より意図的に外してある。このため特に条件2では二酸化炭素濃度が著しく高くなり、また容積変化も大きかった。しかし、この様な条件を含めて、実測値と計算値が良く一致したことは、今回提案した空容積測定法が様々な条件においても適用可能であり、実用的であることを示している。

一方、条件1、2、3において、初発呼吸量は同一とならなければならないが、今回の結果ではバラつきが見られた。これはガス濃度変化の最も顕著な貯蔵開始直後のデータ収集が充分でなく、0~1日における回帰が必ずしも適切でなかったためと考えられる。2日目以後においては、ガス濃度変化は著しくなく、十分な精度で呼吸を評価できた。今後包装直後から一日後までのデータ収集の頻度を高める必要がある。

収穫直後の青果物の呼吸は雰囲気ガス組成と温湿度によって決まる。しかし、同一貯蔵条件下においても貯蔵、流通中にセネセンスが進行すれば、呼吸活性も影響を受けると考えられる。YangとChinnan¹⁴⁾はトマトの呼吸速度モデルをガス濃度と貯蔵日数の関数として構築し、MA包装した袋内平衡ガス濃度変化を一か月の長期にわたりの確に予測した。しかし、呼吸の経時変化を考慮した呼吸モデルは、これ以外にはほとんどみられな

い。ブロッコリーにおいてもFig. 5に示したように、空気下において呼吸を評価すると呼吸活性の明確な低下が認められた。しかし、MA包装した低酸素濃度下において未開封のまま呼吸を測定した場合、2日目以降平衡を維持していた。すなわち、経時的な呼吸活性の低下よりも低酸素条件による呼吸抑制効果の方が大きく、このことはブロッコリーの場合において、15℃以下で、一週間程度の鮮度保持を考える場合には呼吸の経時変化を考慮しなくても適切な包装設計ができることを示唆している。いいかえると、比較的短期間における呼吸モデルには、時間のファクターを組み入れなくてもよく、温湿度とガス条件のみによって適切な包装設計が可能なが明かとなった。一方貯蔵が長期にわたれば低酸素下においても時間経過にともなう呼吸活性の低下はまぬがれないと考えられ、時間のファクターを組み入れる必要がある。

包装設計の適否を判断するためには、呼吸商を評価することがきわめて重要である。ブロッコリーの場合には、低酸素条件下ではクロロフィルの分解が抑制されるため外観上の評価は好氣的包装条件より高くなる。しかし、嫌気呼吸が進行するような低酸素下ではアルコールやアルデヒドによる異臭が強くなり、食味は著しく低下する¹⁶⁾。包装貯蔵中の青果物の呼吸商を求めるためには、破袋しないで呼吸を評価しなければならない。破袋後に青果物を取り出して呼吸を評価しても呼吸商は1以下となり (Fig. 5)、包装設計の適否を判断することはできない。また、単に包装系内のガス濃度を評価したのみでは適正な条件であるかどうかは不明である。Fig. 1に示したように、条件3において袋内酸素濃度は2

日目を降約1~2%、二酸化炭素濃度は約4~5%、である。これらの濃度が適性条件であるかどうかは、異臭の有無や色調などから判断する必要がある。しかし、本報告の方法で求めた呼吸速度の結果から、RQは約0.9~1 (Fig. 4) であり適切な包装条件が得られていると考えられる。一方、条件1、2ではRQは1を越え、特に条件2では著しく高く、包装条件として適切ではないと考えられる。以上のように包装系内の青果物の呼吸評価を未開封のまま行えば、包装設計の適否の判断や呼吸モデルの構築にあたって、極めて有用な情報を容易に得ることができる。

6. 結 論

MA包装で鮮度保持を行うためには、炭酸ガス障害や嫌気呼吸を回避するため適切な包装設計を行わなければならない。そのためには包装系内における青果物の呼吸を的確に評価する必要がある。本報告で述べた呼吸評価法は、包装系内のガス濃度と初発空容積の測定のみで包装系内の呼吸を、破袋することなく測定でき、有用性は高いと考えられる。本報告では、ブロッコリーを用いたが、他の青果物にも適用することにより、特別な装置を用いることなく、呼吸評価が可能である。

<文 献>

- 1) A. A. Kader, D. Zagory and E. L. Kerbel, *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 28, 1 (1989)
- 2) A. A. Kader, *Food Technol.*, 40 (5), 99

- (1986)
- 3) P. E. Brecht, *Food Technol.*, 34 (3), 45 (1980)
- 4) A. C. Cameron, W. Boylan-pett and J. Lee, *J. Food Sci.*, 54 (6), 1413 (1989)
- 5) Y. S. Henig and S. G. Gilbert, *J. Food Sci.*, 40, 1033 (1975)
- 6) V. Jurin and M. Karel, *Food Technol.*, 17 (6), 104 (1963)
- 7) C. C. Yang and M. S. Chinnan, *Trans. ASAE.*, 30 (2), 548 (1987)
- 8) C. F. Forney, R. E. Rij and S. R. Ross, *HortScience.*, 24 (1), 111 (1989)
- 9) D. S. Lee, P. E. Hagggar, J. Lee and K. L. Yam, *J. Food Sci.*, 56 (6), 1580 (1991)
- 10) 椎名(小野寺) 武夫、河野澄夫、岩元睦夫、園芸学会雑誌、56 (4), 486 (1988)
- 11) 山下市二、山口優一、伏見力、青木章平、日本食品低温保蔵学会誌、15 (2), 61 (1989)
- 12) 平田孝、西山武夫、佐藤博実、石川豊、石谷孝佑、園芸学会雑誌、60, 別2, 624 (1991)
- 13) D. R. Dilley, *J. Food Biochem.*, 2, 235 (1978)
- 14) C. C. Yang and M. S. Chinnan, *Trans. ASAE.*, 31 (3), 920 (1988)
- 15) K. R. Deily and S. S. H. Rizvi, *J. Food Process Engineering.*, 5, 23 (1981)
- 16) C. F. Forney and R. E. Rij, *HortScience.*, 26 (10), 1301 (1991)

(原稿受付 1992年 9月 18日)

(審査受理 1992年10月 9日)