アボカド (*Persea americana*) の鮮度保持のための簡易包装設計

肖 麗亞・清 田 信

大阪府立大学農学部

Design of a Modified Atmosphere Package for Retaining Freshness of
Avocado (*Persea americana*) Fruits

Liya XIAO and Makoto KIYOTA

College of Agriculture, Osaka Prefecture University, Sakai 599-8531, Japan

The mathematical modeling used to predict the steady-state O_2 partial pressures for design of modified atmosphere (MA) packages of avocado (*Persea americana* 'Fuerte') fruits was developed. The rate of O_2 uptake (R_{O_2}) was determined as a function of O_2 partial pressures by mathematical characterization of O_2 depletion data collected by avocado fruits in a closed system with time. R_{O_2} was used to describe the modeling of packaging ratios (A/W_p) characteristics (film surface area (A), fruit weight in packages (W_p)) as a function of film permeability to O_2 (P_{O_2}) (O_2 permeability coefficient, thickness) to achieve desired O_2 partial pressures of the sealed package for MA packages of avocado fruits. Prediction curves showing steady-state O_2 partial pressures for packaging ratios in the range of 1.5 to 8.6 closely resembled the curves of experimental data. Maximum benefits (for example, weight loss, firmness, visually assessed mean pericarp coloration (brownness) and visual quality of fruit) for avocado fruits in MA packages were obtained when the O_2 partial pressures inside the package was maintained in the range of 1.5 kPa at 20°C. As a result, film specifications and optimization of packaging ratios for avocado fruits in MA packages were calculated based on desired steady-state O_2 partial pressures.

(Received March 27, 2000)

2000年3月27日受付

はじめに

中国南部や東南アジアなどの熱帯・亜熱帯地域で収穫されたバナナ、パパイヤ、アボカド、マンゴーなどの果実は、呼吸量、蒸散量が多いため、鮮度は短期間に著しく低下する。消費されるまでに損耗、腐敗による廃棄量は収穫量の15~40%に達する (Andales and Gragasin, 1998; Feng, 1998; Ramesh, 1998; Siri-phanich, 1998; To, 1998)。低温貯蔵とCA貯蔵が青果物の鮮度保持のための環境調節法として効果的ではあるが、コストがかかるため、特に東南アジアおよび中国などの発展途上国においては、鮮度保持設備の不備、冷蔵庫の普及も不十分であるため、常温においてより

安価で簡易な環境調節による青果物の鮮度保持技術の開発が望まれる。

簡易なガス環境調節法の一つとしてはMAP貯蔵 (Modified Atmosphere Packages) すなわちガス透過性をもつプラスチックフィルムの包装により青果物周辺のガス組成を調節し、鮮度保持を図る方法がある。これを実現するには、青果物の呼吸速度とフィルムのガス透過性のバランスをとり、フィルムの種類、厚さおよび表面積そして包装内の青果物の重量を組み合わせ、包装内をさまざまな青果物に好適なガス組成 (高 CO_2 、低 O_2 濃度) にしなければならない (Young et al., 1961; Spalding and Reeder 1975; Geeson et al., 1985; Blanke, 1991; Ke et al., 1995)。MAP貯蔵においては望ましい O_2 濃度に維持することを目的とするため

に、包装内の定常状態における O_2 濃度を予測し、好適な包装条件に維持することが重要な課題である。これまでにトマト、リンゴ、カットブロッコリなど青果物についてのモデルが提出された (Jurin and Karel, 1963; Banks et al., 1989; Cameron et al., 1989; Lee et al., 1991; Gong and Corey, 1994; Talasila et al., 1994; Peppelenbos and van't Leven, 1996)。しかし、厚さの異なるフィルムや広範囲の包装条件のもとで熱帯・亜熱帯産果実については総合的に評価した例はない。

本研究の目的は、密閉容器内のアボカド果実の時間経過とともに変化し、 O_2 消費データから呼吸速度 (O_2 消費速度) を求めることによって、フィルム包装内の定常状態における O_2 分圧を予測する簡便なモデルの作成を試み、厚さが異なるフィルムを用いた MAP 貯蔵において、定常状態の O_2 分圧および呼吸速度 (O_2 消費速度) を予測し、好適な包装条件に制御することである。そして、フィルムの厚さおよび包装条件の違いにより異なる環境ガス組成がアボカド果実の鮮度保持におよぼす影響を検討した。

材料と方法

1. 供試果実

供試材料として、大阪市内の卸売市場で購入した輸入直後のアボカド (*Persea americana* 'Fuerte') を用いた。果実 1 個の重さは 210~270 g で、果皮は緑色のものを用いた。防腐処理をせず、果実表皮に損傷を持つものを除いた。実験は 1999 年 7~9 月に行った。

2. 実験に用いたモデル

2.1 モデルの作成

フィルム包装内のガス濃度のモデル化は、定常状態において果実の呼吸により消耗した O_2 の量が包装内に透過してきた O_2 の量に等しいとして行った。フィルムの O_2 透過量 ($J_{O_2}^{film}$) はガス拡散の Fick の法則に基づいて計算した。

$$J_{O_2}^{film} = P_{O_2} A ([O_2]_{atm} - [O_2]_{pkg}) \quad (1)$$

ここで、 P_{O_2} は O_2 に対するフィルムの透過率 ($mmol \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)、 A はフィルムの表面積 (cm^2)、 $[O_2]_{atm}$ は包装外の空気中の O_2 分圧 (kPa)、 $[O_2]_{pkg}$ は包装袋内の O_2 分圧 (kPa) である。

フィルム包装内の果実の呼吸による O_2 消費量 ($J_{O_2}^{fruit}$) は次式で表される。

$$J_{O_2}^{fruit} = R_{O_2} W_p \quad (2)$$

ここで、 R_{O_2} は単位重量の果実の O_2 消費速度 ($mmol \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) であり、 W_p は果実重量 (kg) である。

フィルム包装内では定常状態のとき、式 (1)、(2) より、次式が成り立つ。

$$P_{O_2} A ([O_2]_{atm} - [O_2]_{pkg}) = R_{O_2} W_{pkg} \quad (3)$$

包装比 (A/W_p) を分離し、式 (3) より次式が得られる。

$$\frac{A}{W_{pkg}} = \frac{R_{O_2}}{P_{O_2} ([O_2]_{atm} - [O_2]_{pkg})} \quad (4)$$

本研究において、測定した 0.002 cm, 0.004 cm, 0.006 cm の厚さの低密度ポリエチレンフィルム (LDPE) の P_{O_2} は、20°C のときそれぞれ 9.54×10^{-6} , 4.77×10^{-6} , 3.18×10^{-6} , 28°C のときそれぞれ 1.45×10^{-5} , 7.27×10^{-6} , 4.84×10^{-6} ($mmol \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$) であった。

一方、果実の呼吸による O_2 消費速度 (R_{O_2}) は、密閉容器内において果実の呼吸による O_2 分圧の経時変化から求めた。

まず、任意の時間における O_2 分圧を次式で近似した。

$$[O_2] = at^2 + bt + c \quad (\leq 0) \quad (5)$$

ここで、 $[O_2]$ は密封容器内の O_2 分圧 (kPa) であり、 t は容器を密封後の時間 (h) であり、そして a , b , c は定数である。

果実の呼吸による O_2 分圧の変化は、次式より求まる。

$$\frac{d[O_2]}{dt} = 2at + b \quad (\leq 0) \quad (6)$$

したがって、単位重量の果実の呼吸速度 (R_{O_2}) は次式となる。

$$R_{O_2} = \frac{10}{22.4} \frac{(2at + b)}{1.013} \frac{V}{W_R} \frac{273}{273 + T} \quad (7)$$

ここで、 W_R は密封容器内の果実重量 (kg) であり、 V は密封容器の空隙容積 (L) であり、 T は密封容器内の気温 (°C) である。

式 (5)、(7) より R_{O_2} は次式となる。

$$R_{O_2} = \frac{10}{22.4} \frac{\sqrt{b^2 - 4a(c - [O_2])}}{1.013} \times \frac{V}{W_R} \frac{273}{273 + T} \quad (8)$$

したがって、定常状態における包装内の O_2 分圧の予測式は式 (4)、(8) より

Fig. 1 Nonsteady-state respiratory depletion of O_2 by avocado at $20^\circ C$.
Data averaged at 1 h intervals (■) and the best-fit line. The R^2 value was from second-order regression analysis.

$$\frac{A}{W_{pg}} = \frac{10}{22.4} \frac{\sqrt{b^2 - 4a(c - [O_2]_{pg})}}{1.013 \times P_{O_2}([O_2]_{atm} - [O_2]_{pg})} \times \frac{V}{W_r} \frac{273}{273 + T} \quad (9)$$

となる。式(9)から好適な包装条件すなわち包装比(A/W_p)とフィルムの酸素ガス透過率(P_{O_2})、定常状態における包装内の酸素分圧($[O_2]_{pg}$)の関係を求めることができる。

2.2 モデルに用いたパラメータの測定

5 Lの気密性容器三つのそれぞれにアボカド果実(770 ± 5 g)を密封し、各容器の O_2 分圧を1 kPa未満に減少するまで1時間ごとに酸素センサ(KE-50 日本電池)により連続測定した。アボカドの呼吸による O_2 分圧の変化を2次の多項式($[O_2] = at^2 + bt + c$, $R^2 = 0.996$)で近似した。それぞれの係数は $a = 1.30 \times 10^{-2}$, $b = -1.02$, $c = 20.98$ であった (Fig. 1)。

3. MAPによる鮮度保持実験

3.1 包装条件

モデルを評価するために、厚さがそれぞれ0.002 cm, 0.004 cm, 0.006 cmで、表面積(A)が1 870 cm²の低密度ポリエチレンフィルムを用い、包装する果実の個数を変えて重量(W_p)を 225 ± 10 gから $1\,255 \pm 10$ gまでの5段階として密封した。包装比(A/W_p)は1.5から8.6 (cm² g⁻¹)の範囲であった。同じ果実重量の袋を各区3組ずつ用意し合計45組を20および28°Cで7日間鮮度保持効果について調べた。

3.2 定常状態におけるガス組成および呼吸速度

フィルム包装内の CO_2 と C_2H_4 濃度は経時的にガラスシリンジでそれぞれ1 mLずつのガスサンプルを抜き取り、ガスクロマトグラフ(GC-663型 日立製作所, GC-14B 島津製作所)により測定した。また、 O_2 分圧は、酸素センサ(KE-50 日本電池)により測定した。

呼吸速度(O_2 消費速度)は包装袋内の定常状態における O_2 分圧およびフィルムの O_2 透過率を用いて算定した。

3.3 果実の鮮度評価

果実の鮮度評価基準として果皮の色、果肉硬度および果実の目減りを測定した。また、腐敗の有無などを含めた総合的な外観評価を目視により行った。果皮の色については、各果実の表面積について全体的に緑色を保持(評価値5)、25%が褐変(評価値4)、50%が褐変(評価値3)、75%が褐変(評価値2)、全体的に褐色(評価値1)、の5段階で評価した。果実の硬度は果実硬度計(科学光栄社)を用いて測定し、果肉の総合抵抗力として表した。果実の目減りは鮮度保持実験前後の果実の重量を測定して減量率で表した。

結果および考察

1. 包装条件によるガス組成および果実の呼吸速度の変化

気温20°Cのもとで定常状態下の包装内のガス組成(O_2 , CO_2 および C_2H_4 濃度)の変化をFig. 2に示す。フィルムの厚さの増加につれて、包装内の O_2 分圧が低下し、 CO_2 分圧が増加した。包装比が小さいほどすなわち包装内の果実重量が増加するほど定常状態における O_2 分圧が低くなり、 CO_2 分圧が高くなった。また、エチレンの濃度の変化は厚さ0.002 cmのフィルムに比べて0.004, 0.006 cmのフィルムの場合、エチレンの生成が抑制され、その程度は包装比によって異なった。特に包装比2以下になるとその効果が著しかった。これは包装内の果実の呼吸により速やかに低 O_2 、高 CO_2 分圧となることによって抑制されたと考えられる (Sisler and Wood, 1988; Lange and Kader, 1997)。

また、包装内の定常状態における O_2 消費速度をFig. 3に示す。 O_2 消費速度は、20°C, 28°Cの両気温においても、フィルムの厚さの増加と包装比の低下にともなって小さくなった。これは包装内の O_2 分圧が低下することにより果実の呼吸が抑制されたと考えられる。なお、気温20°Cと28°Cのとき、定常状態下の O_2

Fig. 2 Effect of packaging ratio (A/W_p) on steady-state: O_2 (a), CO_2 (b), and C_2H_4 (c) levels of avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20°C.

分圧の差は小さかったが (28°C のときのデータが未掲載), O_2 消費速度は大きな差が認められた。これは、フィルムの透過率が 28°C の場合は 20°C の約 1.5 倍であったので、温度上昇による呼吸の増加量がこの温度

Fig. 3 Effect of packaging ratio (A/W_p) on the calculated rate of O_2 uptake of avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20 or 28°C.

範囲でのフィルムのガス透過率の増加によって相殺されたためであると推察する。

2. 包装条件による果実の鮮度保持効果

気温 20°C でフィルムの厚さおよび包装比の差による包装内のガス組成 (O_2 , CO_2 および C_2H_4 濃度) の変化が果実の鮮度 (目減り, 硬度, 色) におよぼす影響を Fig. 4 に示す。包装比の低下により果実の目減り (重量の減少率) の低下, 軟化抑制および緑色保持の効果があり, その程度はフィルムの厚さにより異なった。フィルムの厚さが 0.004 cm 以上, 包装比が 2 以下になると効果が著しかった。この効果の一因として, 包装条件の違いにより O_2 分圧が 1~1.5 kPa, CO_2 分圧が 14~16 kPa に変化したことでエチレンの生成が抑制され (Fig. 2), 果実の軟化, 褐変などを抑制したと考えられる。また, 貯蔵期間中の果実表皮の色の経時変化を Fig. 5 に示す。包装後日数の経過にともなう緑色

Fig. 4 Effect of packaging ratios (A/W_p) on weight loss (a), firmness (b), and visually assessed mean pericarp coloration (brownness) (c) of avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20°C after 7 d.

から褐色への変化は、フィルムの厚さおよび包装比によって異なり、フィルムの厚さの増加および包装比の低下によって果実の色の変化を抑制した。包装比 (A/W_p) 8.6 の場合はいずれの厚さのフィルムでも貯蔵3日後には果皮が約50%褐色になり、7日後には全

Fig. 5 Visually rated pericarp coloration (brownness) for a range of packaging ratios (A/W_p) of avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20°C for 7 d.

Thickness (cm): 0.002 0.004 0.006
 $A/W_p = 2.0 \text{ (cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}\text{)}$

Fig. 6 The changes of avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages, packing ratios (A/W_p) = 2.0 cm²/g, held at 20°C after 7 d.

Fig. 7 The comparison of predicted steady-state O₂ partial pressures (solid line) with those achieved experimentally (■, ●, ▲) for avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20°C.

Fig. 8 The comparison of predicted rate of O₂ uptake (solid line) with those achieved experimentally (○) for avocado fruits sealed in 0.002, 0.004, or 0.006 cm thick LDPE packages held at 20°C.

面が褐色になって、外観の商品価値がなくなったが、包装比 (A/W_p) 2 以下でフィルムの厚さが 0.004 cm 以上になると、色の変化が最も少なく、包装 3 日後にも色の変化はほとんどなく、7 日後の褐変率も 25% にすぎず緑色保持効果が高かった。果実の外観は、厚さ 0.004 cm と 0.006 cm のフィルムで、包装された重量が $935 \pm 5 \text{ g}$ (包装比 (A/W_p) = 2 cm² g⁻¹) の袋内のものが

最も優れていた (Fig. 6)。

これらの結果より、気温 20°C の場合、O₂ 消費速度が 0.12~0.18 (mmol kg⁻¹ h⁻¹) となる O₂ 分圧約 1.5 kPa、CO₂ 分圧約 14 kPa との組合せが、貯蔵中のアボカドの鮮度保持に有効であった。しかし、28°C の場合は、呼吸速度の増加により果実の鮮度低下が促進され、20°C に比べて貯蔵期間が半分に短縮された。

3. モデルの有効性

定常状態の O₂ 分圧を測定した包装条件は 3 種の厚

Fig. 9 Predicted permeability to O_2 characteristic of film required to maintain a given steady-state O_2 partial pressures for a range of packaging ratios (A/W_p) of avocado fruits held at 20°C in a sealed package environment.

さのフィルムおよび重さ 5 段階のアボカドを用いてモデルを検証した。包装比は $1.5 \sim 8.6 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ まで変化させた。異なる厚さのフィルムに対する包装比により袋内の定常状態の O_2 分圧の実測値 ($[O_2]_E$) と式 (9) により得た予測値 ($[O_2]_P$) と比較した結果を Fig. 7 に示す。また、式 (8) で予測した O_2 消費速度と定常状態における O_2 分圧の実測値を用いて算定した O_2 消費速度の結果を Fig. 8 に示す。これらの結果は、モデルから得られた予測値が、実測値に近似しており、実用的なフィルム包装内のガス組成を予測できることを示している。また、Fig. 9 に式 (9) を用いた包装内の定常状態の O_2 分圧とフィルムのガス透過率 (P_{O_2}) および包装比 (A/W_p) の関係を示す。望ましい定常状態の O_2 分圧をもとにして、これらの曲線は、フィルムの種類および厚さなどの選択と包装条件など広い範囲について包装比の好適条件を示すことが可能となる。

本研究における予測モデルの一つの限界は O_2 消費速度における CO_2 の影響を考慮に入れていないことである。果実の O_2 消費の結果放出される CO_2 が密封容器内に蓄積したが、 CO_2 がアボカド果実の鮮度におよぼす影響は本研究ではほとんど認められず、予測結果は緑熟アボカドにおける CO_2 の影響を 16 kPa までは考慮しなくてもよいことを示唆している。今後、高い CO_2 分圧が O_2 消費速度や鮮度保持に著しく影響をおよぼす青果物についてはモデルの改良を行うなどの工夫が必要である。

アボカドの鮮度を保つための好適な包装条件（フィルムの種類と厚さ、フィルムの表面積および包装され

た果実の重量など）が簡単な数学の手順で予測でき、定常状態における O_2 分圧の予測モデルとして利用可能であり、鮮度保持のための簡易環境調節法としても有効であることがわかった。

文 献

- Andales, S. C., Gragasin, E.M.A. 1998. Priorities and constraints of postharvest technology in the Philippines. Proc. 5th Int. Postharvest Technol in Asia Conf., 9-10 September 1998, Tsukuba, Ibaraki, Japan, p 9-15.
- Banks, N. H., Hewett, E.W., Rajapakse, N. C., Cleland, D. J., Austin, P. C., Stewart, T. M. 1989. Modeling fruit response to modified atmospheres. In "5th Proc. Int. Contr. Atm. Res. Conf." (ed. by Fellman, J. K.), Wenatchee, Washington, D.C., p 359-366.
- Blanke, M. M. 1991. Respiration of apple and avocado fruits. J. Postharvest News Inf. 2: 429-436.
- Cameron, A. C., Walter, B. P., Julian, L. 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. J. Food Sci. 54: 1413-1421.
- Feng, S. Q. 1998. Main postharvest problems and countermeasures for agricultural products in China. Proc. 5th Int. Postharvest Technology in Asia Conf., 9-10 September 1998, Tsukuba, Ibaraki, Japan, p 25-32.
- Geeson, J. D., Browne, K. M., Maddison, K., Shepherd, J., Guaraldi, F. 1985. Modified atmosphere packaging to extend the shelf life of tomatoes. J. Food Technol. 20: 339-349.
- Gong, S., Corey, K. A. 1994. Predicting steady-state oxygen concentrations in modified-atmosphere packages of tomatoes. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 119: 546-550.
- Jurin, V., Karel, M. 1963. Studies on control of respiration of McIntosh apples by packaging methods. Food Technol. 17: 104.
- Ke, D., Yahia, E., Hess, B., Zhou, L., Kader, A. A. 1995. Regulation of fermentative metabolism in avocado fruit under oxygen and carbon dioxide stresses. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 120: 481-490.
- Lange, D. L., Kader, A. A. 1997. Effects of elevated carbon dioxide on key mitochondria respiratory enzymes in 'Hass' avocado fruit and fruit disks. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 122: 238-244.
- Lee, D. S., Hagger, P. E., Lee, J., Yam, K. L. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. J. Food Sci. 56: 1580-1585.
- Peppelenbos, H. W., van't Leven, J. 1996. Evaluation of four types of inhibition for modeling the influence of carbon dioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. Postharvest Biol. Technol. 7: 27-40.
- Ramesh, A. 1998. Priorities and constraints of postharvest technology in India. Proc. 5th Int. Postharvest Technology in Asia Conf., 9-10 September 1998, Tsukuba, Ibaraki, Japan, p 33-43.
- Siriphanich, J. 1998. Postharvest problems in Thailand: priorities and constraints. Proc. 5th Int. Postharvest Technology in Asia Conf., 9-10 September 1998, Tsukuba, Ibaraki, Japan, p 17-23.
- Sisler, E. C., Wood, C. 1988. Interaction of ethylene and CO_2 . Physiol. Plant. 73: 440-444.
- Spalding, D. H., Reeder, W. F. 1975. Low-oxygen high-carbon

- dioxide controlled atmosphere storage for control of anthracnose and chilling injury of avocados. *Phytopathology* **65** : 458-460.
- Talasila, P. C., Cameron, A. C., Joles, D. W. 1994. Frequency distribution of steady-state oxygen partial pressures in modified-atmosphere packages of cut broccoli. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **119** : 556-562.
- To, L. V. 1998. Priorities and constraints of postharvest technologies in Vietnam. *Proc. 5th Int. Postharvest Technology in Asia Conf.*, 9-10 September 1998, Tsukuba, Ibaraki, Japan, p 1-8.
- Young, R. E., Romani, R. J., Biale, J. B. 1961. Carbon dioxide effects on fruit respiration. II. Response of avocados, bananas, & lemons. *Plant Physiol.* **37** : 416-422.