

青果物の組織内間隙における O₂, CO₂ 濃度の予測

疋田 慶夫・森松 和也*

Yoshio HIKIDA and Kazuya MORIMATSU*

Prediction Method of O₂ and CO₂ Concentrations in the Intercellular Space of Fresh Produce.

Abstracts

Under the condition that surface area and resistance to gas diffusion of fresh produce are already known, the method to predict O₂ and CO₂ concentrations in the intercellular space by using the respiration rate of the produce was described. The mathematical model which shows the gas exchange between inside and outside the produce was developed and the prediction method based on the model was provided. Surface area and resistance to gas diffusion in citrus fruit were measured and O₂ and CO₂ concentrations in the intercellular space of the citrus in closed box experiments conducted under 5, 10 and 20°C were continuously predicted using the respiration rate calculated by the O₂ and CO₂ concentration changes in the boxes. The final predicted values of O₂ and CO₂ concentrations under 5, 10 and 20°C reasonably agreed with the measured and the provided method therefore was confirmed.

Key words: Fresh produce, Intercellular space, Gas exchange model, Gas composition, Prediction

1. 緒言

MA 包装 (modified atmosphere packaging ; 青果物をプラスチックフィルムで包装し, 青果物の呼吸作用とフィルムのガス透過性により, 包装内に鮮度保持に最適とされる大気環境を形成しようとする) や CA 貯蔵 (controlled atmosphere storage ; 青果物を密閉貯蔵庫に収納し, 低温化とともに庫内大気組成を低 O₂・高 CO₂ 条件に制御して呼吸作用を抑制し, 長期的な品質保持を図る) は, 青果物の鮮度や品質保持にとって最適とされるガス組成を青果物の周囲環境に構成しようとする技術である. しかしながら, 果皮などの障壁があるため, 青果物内部の間隙 (以下, 組織内間隙と表記する) におけるガス組成と周囲環境の組成は異なる (樽谷, 1979). 従って, 組織内間隙におけるガス組成を予測し, 制御する技術を確立することによって, 従来の MA 包装や CA 貯蔵技術を改善したり, 個包装, 果皮のコーティング, 予措処理のような青果物表面のガス透過性を直接操作する鮮度保持技術を定量的に提示す

ることができる.

本論文は, カンキツ果実を対象に, 表面積, 組織内ガス拡散抵抗 (レジスタンス) が既知である場合の呼吸速度 (O₂ 吸収速度, CO₂ 発生速度) から, 一定の仮説の下で組織内間隙における O₂ と CO₂ 濃度を予測する方法について述べたものである.

なお, 呼吸速度は呼吸環境の O₂, CO₂ 濃度の変化として反映されるので, 環境の O₂ と CO₂ 濃度の変化から予測する方法とも捉えることができる.

2. 青果物組織内のガス拡散抵抗 (レジスタンス) について

O₂, CO₂, エチレンなどのガスが青果物の組織内を移動する場合, その流束 (移動量) を左右する指標としてレジスタンスがある.

$$\text{流束} = F/R \quad (1)$$

ここで, F は移動のための駆動力で, 組織内の 2 つの領域におけるガスの濃度差である. R がガス移動に対する抵抗を示す指標でレジスタンスと呼ばれる. これはコンダクタンスの逆数に相当する指標であるが, 組織内の各部位のレジスタンスの総和として全体のレジ

スタンスを求めることができるという利点がある (Kays, 1991).

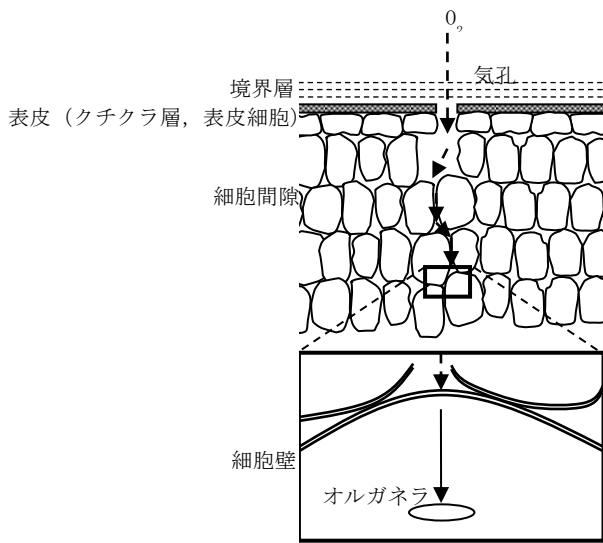


図1 大気中の O_2 が細胞内のミトコンドリアまで移動するときの模式図 (Kays S.J., 1991)

図1に、大気中の O_2 が細胞内のミトコンドリアまで移動するときの模式図を示す。表皮とはクチクラ層と表皮細胞である。 O_2 は、表皮上の境界層→表皮→細胞間隙→細胞壁→原形質膜→細胞質→オルガネラの経路で、それぞれのレジスタンスに抗してミトコンドリア内部まで移動する。このときのトータルレジスタンスは次式で表すことができる (Kays, 1991).

$$r_{total} = r_{bl} + r_{sr} + r_{ias} + r_{cw} + r_p + r_c + r_o \quad (2)$$

- r_{total} : トータルレジスタンス
- r_{bl} : 境界層のレジスタンス
- r_{sr} : 表皮のレジスタンス
- r_{ias} : 細胞間隙のレジスタンス
- r_{cw} : 細胞壁のレジスタンス
- r_p : 原形質膜のレジスタンス
- r_c : 細胞質のレジスタンス
- r_o : オルガネラのレジスタンス

ここで、収穫後の鮮度保持技術への応用を考える場合は、このトータルレジスタンスに注目すればよいものと考えられる。本論文では、カンキツ果実を対象に境界層～細胞間隙までのレジスタンスをガス拡散抵抗とし(細胞壁、原形質膜、細胞質、オルガネラのレジスタンスは考慮しない)、細胞間隙におけるガス組成の予測を試みる。なお、カンキツ果実は果心における間隙など比較的大きい間隙を有するので、細胞間隙を組織内間隙と表記することにした。

3. ガス交換の数学モデル

組織内間隙におけるガスの濃度勾配や青果物内部の温度勾配は考慮せず、これらは均一であるものとし、青果物を集中系と仮定する。青果物の組織細胞は組織内間隙で呼吸作用を行うものとする、その結果発生した間隙と組織外大気との間の濃度差に応じて、拡散抵抗に抗したガスの移動が生じる。このガス交換の様子は次式の数学モデルで記述することができる。

$$\begin{cases} V_{in} \frac{dC_o}{dt} = \frac{A}{R_o} (C_{ao} - C_o) - R_{O_2}(T, C_o, C_c) \cdot m & (3) \\ V_{in} \frac{dC_c}{dt} = \frac{A}{R_c} (C_{ac} - C_c) + R_{CO_2}(T, C_o, C_c) \cdot m & (4) \\ V_{in} \frac{dC_N}{dt} = \frac{A}{R_N} (C_{aN} - C_N) & (5) \end{cases}$$

V_{in} : 組織内間隙の体積(m^3)

C_o, C_c, C_N : 組織内間隙における O_2, CO_2, N_2 の濃度($m^3 \cdot m^{-3}$)

R_o, R_c, R_N : O_2, CO_2, N_2 のガス拡散抵抗($s \cdot m^{-1}$)

C_{ao}, C_{ac}, C_{aN} : 大気中 O_2, CO_2, N_2 の濃度($m^3 \cdot m^{-3}$)

$R_{O_2}(T, C_o, C_c)$: 青果物組織による O_2 消費速度($m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)

$R_{CO_2}(T, C_o, C_c)$: 青果物組織による CO_2 発生速度($m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)

A : 青果物の表面積(m^2)

t : 時間(s)

m : 青果物の質量(kg)

ここで、(3)式における $\frac{A}{R_o} (C_{ao} - C_o)$ は周囲環境

と青果物との間の O_2 の移動量を示しており、いわば「見かけの O_2 吸収速度($m^3 \cdot s^{-1}$)」である。また、(4)式

における $\frac{A}{R_c} (C_{ac} - C_c)$ は「見かけの CO_2 発生速度

($m^3 \cdot s^{-1}$)」である。従って、「見かけの呼吸商」は

$$RQ' = \frac{\frac{A}{R_c} (C_{ac} - C_c)}{\frac{A}{R_o} (C_{ao} - C_o)} \quad (6)$$

となる。 $R_{O_2}(T, C_o, C_c)$ と $R_{CO_2}(T, C_o, C_c)$ は、青果物の温度 T および C_o, C_c の関数として示されている。

また、熱移動を考慮する場合は、次式を併せて導入する。

$$mS \frac{dT}{dt} = \frac{A}{H} (T_a - T) + mq \quad (7)$$

S : 青果物の比熱($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

H : 熱移動の抵抗($\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kJ}^{-1}$)

T_a : 大気温度(K)

T : 青果物の温度(K)

q : 単位質量・単位時間当たり呼吸熱($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

4. 組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の予測方法

青果物の表面積, ガス拡散抵抗が既知である場合は, 上記の「見かけの O_2 吸収速度」と「見かけの CO_2 発生速度」を測定することにより, 大気中の O_2 , CO_2 濃度から間隙内 O_2 濃度と CO_2 濃度を求めることができる. すなわち, 測定された O_2 吸収速度を $RO(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$, CO_2 発生速度を $RC(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ とすると

$$RO = \frac{A}{R_o} (C_{ao} - C_o) \quad (8)$$

$$RC = -\frac{A}{R_c} (C_{ac} - C_c) \quad (9)$$

より

$$C_o = C_{ao} - \frac{R_o}{A} RO \quad (10)$$

$$C_c = C_{ac} + \frac{R_c}{A} RC \quad (11)$$

で計算することができる.

5. 材料および方法

(10), (11)式に基づいて組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の予測が可能であることを確認するため, 密閉系測定装置を利用した実験を行った. 実験の概要は, カンキツ果実のガス拡散抵抗を測定し, 密閉系測定装置により見かけの O_2 吸収速度と CO_2 排出速度の測定を行った後, 最後に組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の測定を行うものである. そして, この実測値と計算による予測値を比較した. なお, 本研究では熱移動は考慮しないものとした. 実験の期間は 2013 年 11 月 29 日 ~ 12 月 25 日である.

5.1. 材料

2013 年 11 月 28 日に愛媛大学農学部附属農場で収穫した 2L サイズの久能ウンシュウミカンを 3 個 (試料 No.1, 2, 3, 質量はそれぞれ 152.8, 193.1, 193.4 g, 果径はそれぞれ縦径 5.3, 横径 7.6, 縦 5.7, 横 8.1, 縦

5.7 cm, 横 8.3 cm) 使用した. 5°C で包装貯蔵しながら, 翌日より実験に使用した.

5.2. 果実表面積と体積の測定

表面積は, 2009 年 11 月に附属農場で収穫した 32 個の試料 (S, M, L, 2L サイズ, それぞれ 8 個) において得られた次の実験式に質量を代入して求めた. ここでは, 採取した果皮の複写機による投影面積から表面積を算出し (トレース法), これを質量の累乗式で回帰した (疋田ら, 2006).

$$A = 0.00048994n^{0.6797}, \quad R^2 = 0.99 \quad (12)$$

A : 表面積(m^2)

n : 質量(g)

体積は, 試料果実を水中に沈め浮力を測定する方法 (水置換法) により測定した.

5.3. ガス拡散抵抗の測定

Cameron and Yang による方法 (Cameron and Yang, 1982) を一部修正した方法 (Dirpan et al., 2016) により, 試料果実毎の抵抗値を 20°C で測定した. 測定はエタンの吸収過程と放出過程より構成されている. 吸収過程では, エタンガスと空気を混合した約 $2000 \mu\text{molmol}^{-1}$ の混合気体を密閉容器 (アクリル製, 容積 2L) に 3 時間導入し, エタンを容器内の試料に吸収させた. なお, この吸収時間については, 3, 5, 7 時間による予備実験の結果から決定したものである. エタンを吸収した試料を直ちに放出過程の密閉容器 (アクリル製, 容積 10.443 L) に移動し, 試料からのエタン放出に伴う容器内エタン濃度の変化を, ガスクロマトグラフ (検出器 FID) により測定開始後 1 時間は 5 分間隔で合計 12 回, 以降は 10 分間隔で 6 回, 合計 2 時間測定した. ガス拡散抵抗の値は試料の体積, 質量, 表面積とこれら吸収過程と放出過程のエタン濃度を利用して計算した.

5.4. 密閉系測定装置による見かけの O_2 吸収速度と CO_2 排出速度の測定および組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の計算

5.4.1. 見かけの O_2 吸収速度と CO_2 排出速度の測定

密閉容器 (アクリル製, 内面寸法 $11 \times 11 \times 11 \text{ cm}$, 内部空間攪拌用の体積 20 cm^3 の小型 DC ファンを設置) を 3 個使用して, 容器 No.1 に 152.8 g, No.2 に 193.1 g, No.3 に 193.4 g の試料を設置して, それぞれ 5°C , 10°C , 20°C における容器内 O_2 , CO_2 濃度の変化を, 5°C では 36 時間間隔で 504 時間, 10°C では 24 時間間隔で 192 時間, 20°C では 12 時間間隔で 120 時間, 同時進行で測

定した．容器に設置したシリコンセプタムより 0.5 ml の気体を採取して，ガスクロマトグラフ（検出器；TCD，カラム；WG-100 ステンレス 内径 1/4"長さ 1.8 m，INJ/DET TEMP；80 °C，COL TEMP；50 °C，CURRENT；120 mA，ATTENUATION；16，CARRIER GAS；ヘリウム 130 kPa）により O₂，CO₂濃度を定量した．

密閉容器にはわずかなガス漏れが生じるので，これを考慮した容器内 O₂ と CO₂ ガスの体積変化は次式で表すことができる．ただし，ここでは呼吸作用に伴う，および湿度変化による容器内の全圧の変化はないものと仮定している．

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = K \left(P_o - P_T \frac{V_o(t)}{V} \right) - RO \quad (13)$$

$$\frac{dV_c(t)}{dt} = K \left(P_c - P_T \frac{V_c(t)}{V} \right) + RC \quad (14)$$

$V_o(t)$: 時間 t における容器内のO₂の体積(m³)

$V_c(t)$: 時間 t における容器内のCO₂の体積(m³)

K : ガス移動係数(m³/s/kPa)

P_o : 外気のO₂の分圧(kPa)

P_c : 外気のCO₂の分圧(kPa)

P_T : 容器内の全圧(kPa)

V : 容器内の空間体積(m³)

RO : 見かけのO₂吸収速度(m³/s)

RC : 見かけのCO₂排出速度(m³/s)

t : 時間(s)

ただし， $P_T = 101.325$ ， $P_o = 21.2276$ ，

$P_c = 0.0334373$ (kPa) で変化しないものとする．

(13)，(14)式の両辺を V で除すことにより，

$$\frac{dV_{oc}(t)}{dt} = \frac{K}{V} (P_o - P_T V_{oc}(t)) - \frac{1}{V} RO \quad (15)$$

$$\frac{dV_{cc}(t)}{dt} = \frac{K}{V} (P_c - P_T V_{cc}(t)) + \frac{1}{V} RC \quad (16)$$

$V_{oc}(t)$: 時間 t における容器内のO₂の濃度(m³・m⁻³)

$V_{cc}(t)$: 時間 t における容器内のCO₂の濃度(m³・m⁻³)

が得られる．これより

$$RO = -V \frac{dV_{oc}(t)}{dt} + K(P_o - P_T V_{oc}(t)) \quad (17)$$

$$RC = V \frac{dV_{cc}(t)}{dt} - K(P_c - P_T V_{cc}(t)) \quad (18)$$

として，見かけのO₂吸収速度とCO₂排出速度を求める

ことができる．

実験では，所定の時間間隔 Δt (s)で容器内の O₂ 濃度 $V_{oc}(t)$ ，CO₂濃度 $V_{cc}(t)$ の変化を測定するので，

$\frac{dV_{oc}(t)}{dt}$ と $\frac{dV_{cc}(t)}{dt}$ を前方差分で

$$\frac{dV_{oc}(t)}{dt} = \frac{V_{oc}(t + \Delta t) - V_{oc}(t)}{\Delta t} \quad (19)$$

$$\frac{dV_{cc}(t)}{dt} = \frac{V_{cc}(t + \Delta t) - V_{cc}(t)}{\Delta t} \quad (20)$$

$V_{oc}(t)$ と $V_{cc}(t)$ を

$$V_{oc}(t) = \frac{V_{oc}(t) + V_{oc}(t + \Delta t)}{2} \quad (21)$$

$$V_{cc}(t) = \frac{V_{cc}(t) + V_{cc}(t + \Delta t)}{2} \quad (22)$$

で近似すると，(17)，(18)式は次式で表される．

$$RO = -V \left(\frac{V_{oc}(t + \Delta t) - V_{oc}(t)}{\Delta t} \right) + K \left\{ P_o - P_T \left(\frac{V_{oc}(t) + V_{oc}(t + \Delta t)}{2} \right) \right\} \quad (23)$$

$$RC = V \left(\frac{V_{cc}(t + \Delta t) - V_{cc}(t)}{\Delta t} \right) - K \left\{ P_c - P_T \left(\frac{V_{cc}(t) + V_{cc}(t + \Delta t)}{2} \right) \right\} \quad (24)$$

(23)，(24)式により，時間間隔 Δt で測定した容器内の O₂ 濃度と CO₂ 濃度より見かけの O₂ 吸収速度と CO₂ 排出速度を求めることができる．また，これらは $t \sim t + \Delta t$ における平均的な見かけの O₂ 吸収速度と CO₂ 排出速度と考えることができる．一方，容器からのガス漏れが無視できる場合は $K=0$ とすればよい．

ここで，ガス移動係数 K については，予備実験により決定した．すなわち，ガスタイトシリンジにより 3 個の密閉容器にそれぞれ 50 ml の CO₂ を封入した後，5°C，10°C，20°Cにおける容器内 CO₂ 濃度の 146 時間にわたる変化を測定し，計算により求めた．なお，CO₂ の封入に際しては，容器内が外気圧に対して正圧になることをさけるため，容器内の空気をガスタイトシリンジで 50 ml 排除した後に封入した．ガス移動係数の値は 5°C，10°C，20°Cにおいて，それぞれ 3.330×10^{-12} ， 2.389×10^{-12} ， 4.975×10^{-12} が得られたが，温度による差異は考慮せず平均値である 3.565×10^{-12} を計算に使用した．

5.4.2. 間隙内 O₂，CO₂ 濃度の計算

組織内間隙における O₂ 濃度と CO₂ 濃度は(10)，(11)式により求めることができる．これらの式を密閉系測定装置に適用する場合は，

$C_{ao} = V_{oc}(t)$ ， $C_{ac} = V_{cc}(t)$ である．

従って、(10), (11)式に(23), (24)式を代入し、同様に(21), (22)式の近似を適用すると、

$$C_o = \frac{V_{oc}(t) + V_{oc}(t + \Delta t)}{2} - \frac{R_o}{A} \left[-V \left(\frac{V_{oc}(t + \Delta t) - V_{oc}(t)}{\Delta t} \right) + K \left\{ P_o - P_r \left(\frac{V_{oc}(t) + V_{oc}(t + \Delta t)}{2} \right) \right\} \right] \quad (25)$$

$$C_c = \frac{V_{cc}(t) + V_{cc}(t + \Delta t)}{2} + \frac{R_c}{A} \left[V \left(\frac{V_{cc}(t + \Delta t) - V_{cc}(t)}{\Delta t} \right) - K \left\{ P_c - P_r \left(\frac{V_{cc}(t) + V_{cc}(t + \Delta t)}{2} \right) \right\} \right] \quad (26)$$

として、間隙内 O_2 , CO_2 濃度 ($m^3 \cdot m^{-3}$) を計算することができる。また、これらの O_2 , CO_2 濃度は、 $t \sim t + \Delta t$ における平均的な濃度と考えることができる。容器からのガス漏れが無視できる場合は $K=0$ とすればよい。

ここで、 O_2 と CO_2 のガス拡散抵抗の値は次式より計算した (Dirpan et al., 2016)。また、ガス拡散抵抗は温度に依存し温度上昇により減少するが、温度と拡散抵抗の定量的な関係が明らかでないため、間隙内 O_2 , CO_2 濃度の計算には $20^\circ C$ での値を使用した。

$$R_o = \frac{R_E}{0.968} \quad (27)$$

$$R_c = \frac{R_E}{0.826} \quad (28)$$

R_o : O_2 のガス拡散抵抗 ($s \cdot m^{-1}$)

R_c : CO_2 のガス拡散抵抗 ($s \cdot m^{-1}$)

R_E : エタンガスのガス拡散抵抗 ($s \cdot m^{-1}$)

5.5. 組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の測定

上記の密閉系測定装置による測定が終了した試料の間隙内 O_2 , CO_2 濃度を測定した (Yoo et al., 1997) (図2)。測定が終了した試料を直ちにガラス製ロートで真空デシケーター (アクリル製、容量 19L) 内の $MgSO_4$ 飽和水溶液に沈め、ロート上部の残気を排除した後、真空ポンプ (DA-15D, (株)アルバック製) で減圧 (-0.06 MPa, 1分間) して、間隙内の空気をロート上部に採取した。そして、ロート上部のシリコンセプタムより 0.5 ml の気体を採取して、ガスクロマトグラフ (検出器; TCD) により気体濃度を測定した。

6. 結果および考察

6.1. ガス拡散抵抗

試料 No.1, 2, 3 におけるエタンガスを利用したガス拡散抵抗の測定値は、それぞれ 3.79×10^5 , 4.05×10^5 , 3.92×10^5 (s/m) となった。

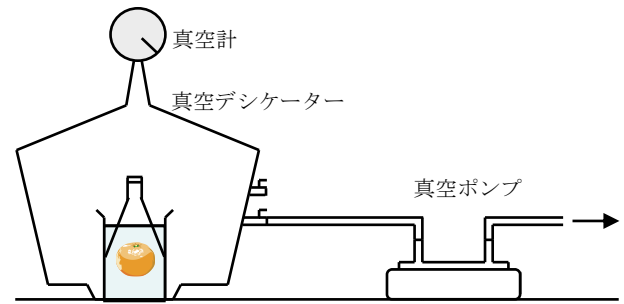


図2 組織内間隙における O_2 , CO_2 濃度の測定装置

6.2. 密閉容器内の O_2 , CO_2 濃度の変化および見かけの O_2 吸収速度と CO_2 排出速度

容器内の O_2 , CO_2 濃度の変化を図3に示す。 $5^\circ C$, $10^\circ C$ では O_2 , CO_2 ともほぼ直線的に変化したが、 $20^\circ C$ では呼吸作用の抑制現象が見られ指数関数的に変化した。

測定時間間隔で計算した見かけの O_2 吸収速度と CO_2 排出速度の変化を図4に示す。なお、呼吸速度は単位時間および試料 1kg 当たりの O_2 吸収量と CO_2 排出量に換算して示した (HAGGER et al., 1992)。 $5^\circ C$, $10^\circ C$ では測定時間中の呼吸速度はほぼ一定値を示したが、

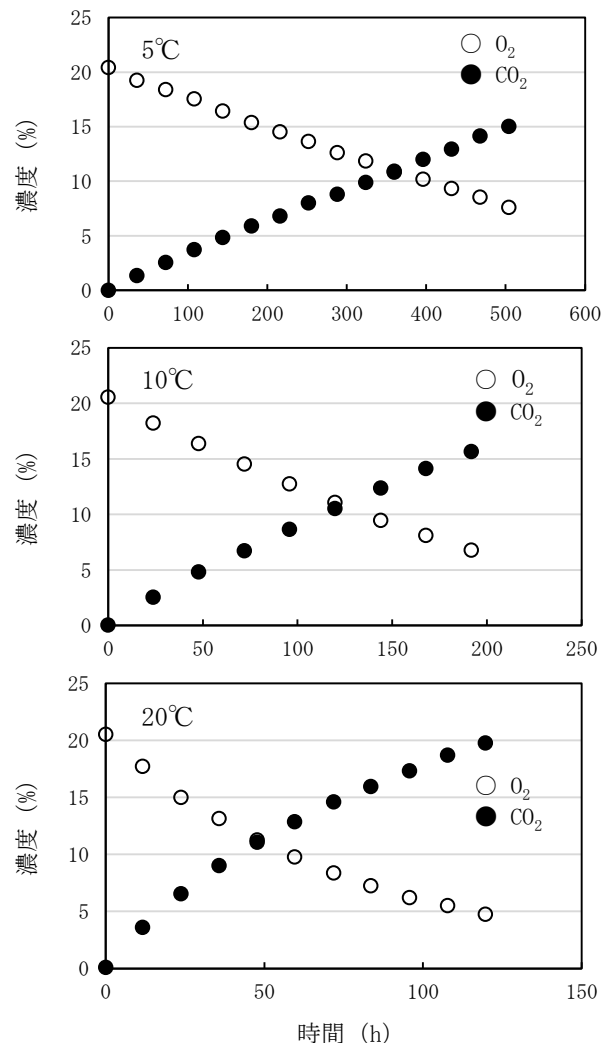


図3 容器内 O_2 , CO_2 濃度の変化

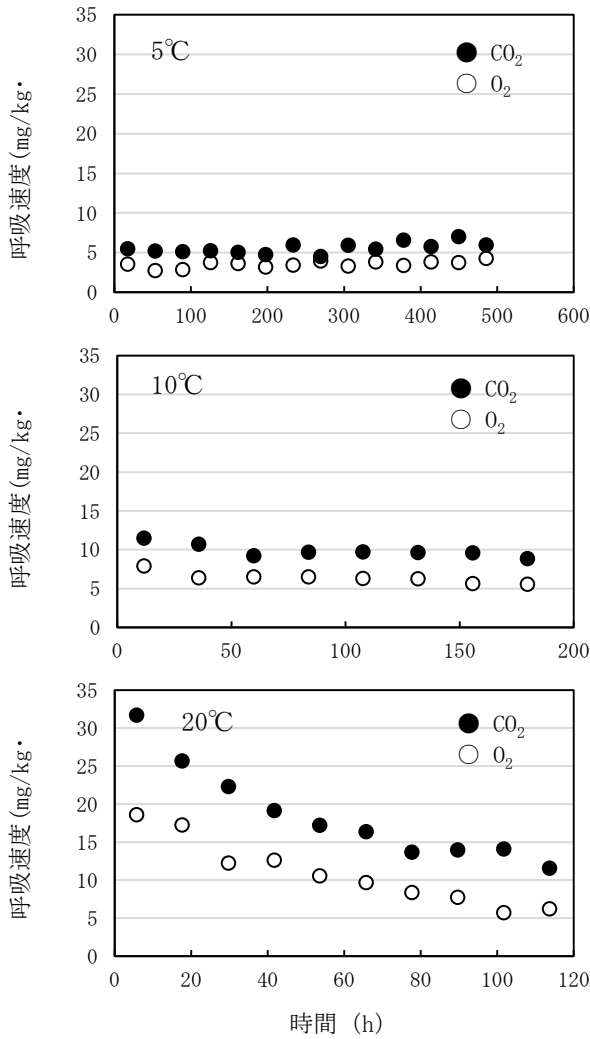


図4 見かけの O₂ 吸収速度と CO₂ 排出速度の変化

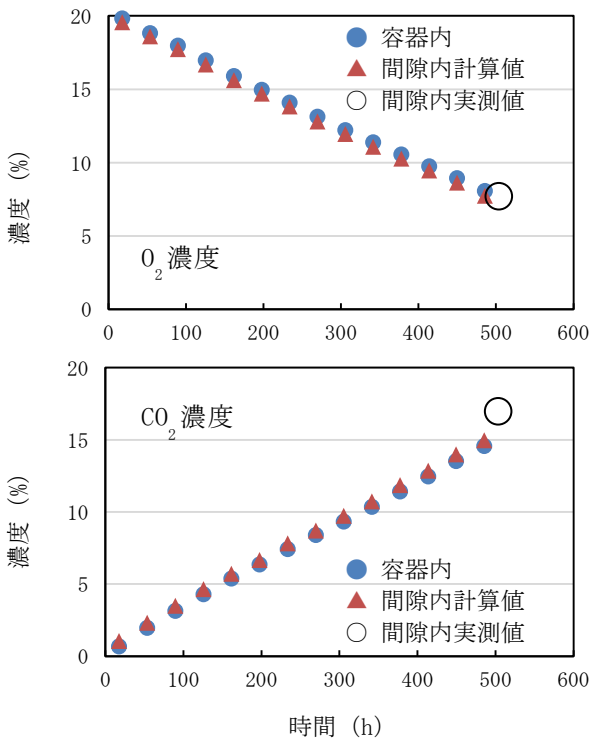


図5 容器内と間隙内の O₂, CO₂ 濃度の変化(5°C)

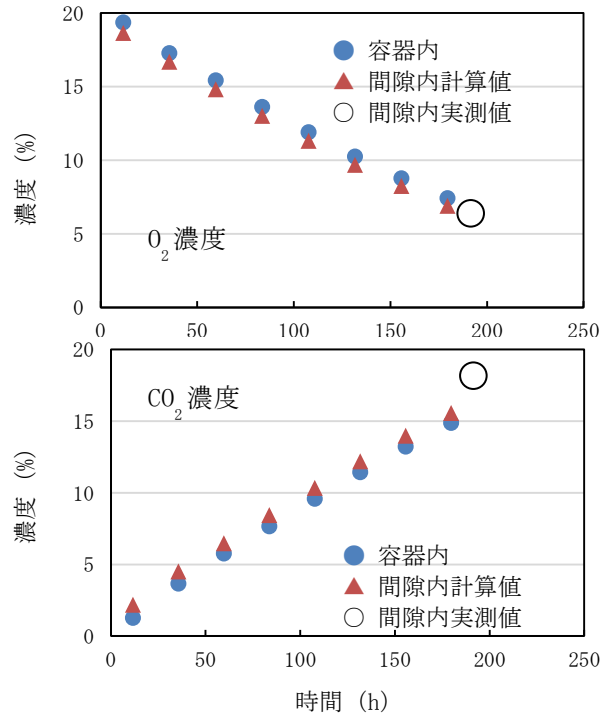


図6 容器内と間隙内の O₂, CO₂ 濃度の変化(10°C)

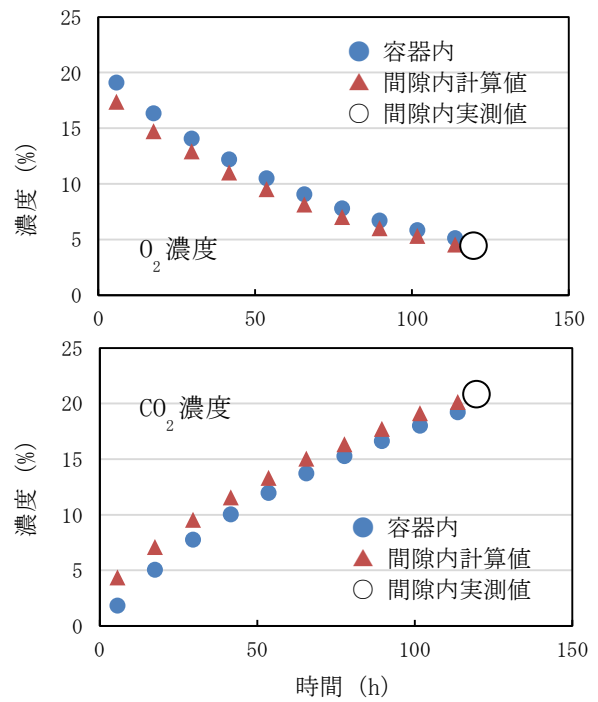


図7 容器内と間隙内の O₂, CO₂ 濃度の変化(20°C)

20°Cでは漸減傾向を示し、時間とともに呼吸作用が抑制された。測定終了時の呼吸商は5°C、10°C、20°Cにおいて、それぞれ1.02、1.16、1.35となり、有気的呼吸が保証されたものと考えられた。

6.3. 組織内間隙における O₂, CO₂ 濃度

間隙内 O₂, CO₂ 濃度の計算結果を図5(5°C), 6(10°C), 7(20°C)に示す。密閉容器内 O₂, CO₂ 濃度の実測値とともに、表1に示した間隙内の実測値を併せて表示

表 1 間隙内 O₂, CO₂ 濃度の測定結果

	No. 1 (5°C)	No. 2 (10°C)	No. 3 (20°C)
経過時間 (h)	504.0	191.8	119.8
O ₂ 濃度 (%)	7.7	6.4	4.4
CO ₂ 濃度 (%)	17.0	18.2	20.8

した。

容器内と間隙内の濃度差（絶対値）は、5°Cにおいて O₂の平均値が 0.28, CO₂が 0.38 %となった。10°Cと 20°Cにおける濃度差は時間とともに漸減したが、濃度差の平均値（絶対値）は 10°Cで O₂が 0.59, CO₂が 0.78 %, 20°Cで O₂が 1.0, CO₂が 1.5 %となり、温度の上昇に伴い濃度差が増加した。なお、ガス拡散抵抗は温度に依存し温度上昇により減少するが、計算には 20°Cにおけるガス拡散抵抗値を使用したので、5°Cと 10°Cでは濃度差がやや小さく計算されている可能性がある。

図 5, 6, 7 に示した測定終了時の間隙内の計算値は、概ね実測値と一致する結果が得られ、(10), (11)式に基づいて間隙内 O₂, CO₂ 濃度の予測が可能であるものと考えられた。

7. 摘要

青果物の表面積、組織内ガス拡散抵抗（レジスタンス）が既知である場合の呼吸速度から、組織内間隙における O₂と CO₂ 濃度を予測する方法について述べた。青果物内部と外部との間のガス交換を数学モデルで示し、組織内間隙における O₂, CO₂ 濃度の予測方法を示した。カンキツ果実を利用して、測定した表面積とガス拡散抵抗値、および密閉系測定装置による 5 °C, 10 °C, 20 °Cにおける容器内 O₂, CO₂ 濃度の変化から見かけの O₂ 吸収速度と CO₂ 排出速度を計算し、間隙内

O₂, CO₂ 濃度を経時的に予測した。予測値と容器内 O₂, CO₂ 濃度との比較、および予測の最終値が実測値により確認されたことから、提示した方法によって予測が可能であるものと考えられた。

引用文献

- Cameron, A.C., Yang, F.Y. (1982) A simple method for the determination of resistance to gas diffusion in plant organs. *Plant Physiology* 70: 21-23.
- Dirpan, A., Hikida, Y., Morimatsu, K. (2016) Improving the measurement of resistance to gas diffusion and the resistance characteristics in Citrus Iyo Fruit (Citrus iyo Hort. Ex Tanaka). *Food Preservation Science* 42: 71-77.
- 疋田慶夫, テチャヴィセス ナッタコーン, 河野俊夫 (2006) : タンゴール‘清見’果実のこはん症発生と包装設計のための蒸散特性. *日本食品保蔵科学会誌* 32(5):201-207.
- Hagger, P.E., Lee, D.S., Yam, K.L. (1992) Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiments for fresh produce. *Journal of Food Process Engineering* 15: 143-157.
- Kays, S.J. (1991) Postharvest physiology of perishable plant products. Van Nostrand Reinhold, New York. 409-455.
- 樽谷隆之 (1979) : 果実・そ菜の組織内ガス. *園芸学研究集録* 9:170-176.
- Yoo, K.S., Andersen, C.R., Pike, L.M. (1997) Internal CO₂ concentrations in onion bulbs at different storage temperatures and in response to sealing of the neck and base. *Postharvest Biology and Technology* 12:157-163.