

一般論文

貯蔵温度および酸素濃度がハツカダイコンの品質保持に及ぼす影響程度の比較分析

江嶋 亜祐子*、杉野 直輝**、渡邊 高志**、北澤 裕明**

Comparative Analysis of the Effects of Storage Temperature and Oxygen Concentration on Radish (*Raphanus sativus* var. *sativus*) Quality

Ayuko ESHIMA*, Naoki SUGINO**, Takashi WATANABE** and Hiroaki KITAZAWA**

ハツカダイコンの商品性は、根茎部および葉部の双方の状態により判断される。本研究では、葉が付帯したハツカダイコンの最適貯蔵条件を探索するため、5~20°Cの温度4通りと2~20%の酸素(O₂)濃度6通りを組合せた24条件による貯蔵試験を実施し、呼吸速度(二酸化炭素生成速度)、葉色および根茎色の変化、細根の発達程度について調査した。呼吸速度(Rsp)は低温および低O₂によって抑制され、温度およびO₂と呼吸速度との関係は $Rsp = 2.58T + 0.64O_2 - 8.43$ ($R = 0.96$)で表された。温度の偏回帰係数はO₂濃度の約4倍であり、温度の影響がO₂よりも大きいことが示された。葉色の変化は、低温および低O₂によって抑制された。根茎色の変化は、O₂濃度および温度の違いによる影響は認められなかった。細根の発達は、低温によって抑制された。以上のことから、低O₂による品質保持効果は低温に比べて小さく、流通・貯蔵中に商品性を保持するためには、低温管理が不可欠であることが示された。

Both leaf and root conditions are important aspects of commercial radish (*Raphanus sativus* var. *sativus*) quality. We thus investigated changes in radish respiration rate, leaf color, and root quality after 6-days of storage under 24 different conditions combinatorially incorporating 4 different temperatures (5, 10, 15, and 20 °C) and 6 different oxygen (O₂) concentrations (20, 16, 12, 8, 4, and 2 %). Respiration (CO₂ production) rates (Rsp) were reduced by low temperature and low O₂, and a relationship between temperature (T) and O₂, and the respiration rate could be expressed as $Rsp = 2.58T + 0.64O_2 - 8.43$ ($R = 0.96$). The partial regression coefficient for temperature was approximately 4 times the O₂ concentration, indicating that the effect of low temperature was greater than that of low O₂. A decrease in leaf color was inhibited by both low temperature and low O₂. Root color was not affected by differences in O₂ concentration or temperature. Low temperature was more effective at inhibiting rootlet development than low O₂. These findings suggest that low O₂ exerts less effect than low temperature. Therefore, a low temperature (10 °C or 5 °C) is necessary to maintain radish commercial value.

キーワード: Lab色空間、呼吸速度、細根、重回帰分析、葉色

Keywords: Lab color space, respiration rate, rootlet, multiple regression analysis, leaf color

*福岡県農林業総合試験場, Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center

**国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門 (〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12), Institute of Food Research, NARO, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan

連絡者 (Corresponding author) : 北澤裕明 (Hiroaki KITAZAWA) TEL: 029-838-7191, FAX: 029-838-7996, E-mail: ktz@affrc.go.jp

1. 緒言

収穫後の青果物の品質保持には、温度および雰囲気ガスの調整が有効であり、低温貯蔵や MA 包装等が広く利用されている¹⁾。特に、低酸素 (O_2) の呼吸抑制効果は大きく²⁾、多くの青果物の品質保持に効果的であることが知られている。

赤色や紫色で直径 2~4 cm 程度の球形の根部を有するハツカダイコン (*Raphanus sativus* var. *sativus*) は、愛知県、福岡県および北海道の 3 産地で国内生産量の約 8 割が生産されており³⁾、生産地から離れた消費地まで輸送される場合が多い。主要な流通形態には、葉が付帯した根茎、または葉を切除した根茎の状態の 2 通りがあり、前者では葉の変色や腐敗による品質劣化が発生しやすく、後者よりも日持ち期間が短い⁴⁾。

ハツカダイコンはサラダなどの料理に彩りを添える目的で利用されるため⁵⁾、根部および葉部の外観品質は商品性を左右する重要な要素である。温度 0~5℃、雰囲気ガス濃度を 1~2% O_2 、2~3% CO_2 とすることで品質保持期間が延長できると報告されている⁴⁾が、温度とガス条件のそれぞれが、どの品質項目に影響を及ぼすのかを明確にしておくことで、注目する品質項目を効率的に保持可能な包装等の貯蔵条件の設計が期待できる。しかしながら、この点について検討した報告は見当たらない。

以上より、本研究では貯蔵温度と酸素濃度に着目し、その組合せ条件がハツカダイコンの外観品質に及ぼす影響を解析した。

2. 実験

2.1 実験試料

福岡県内で栽培され、2019 年 8 月に収穫されたハツカダイコンを供試した。品種は夏季栽培用赤系品種 ‘No.1’ とした。播種後 25~27 日で収穫された葉が付帯したハツカダイコン (15~20 g/個体) を農研機構食品研究部門 (茨城県つくば市) に冷蔵輸送し試験に用いた。

2.2 試験ガスの通気

ハツカダイコン 10 個体を入れたアクリル製の密閉型円筒型チャンバー (内径: 180 mm、高さ: 195 mm、容量: 約 4.8L) (Fig. 1) を 24 個用意し、5℃、10℃、15℃ および 20℃ の恒温庫に 6 個ずつ配置した。ガスコントロールシステム (フジプラント) を使い、 O_2 濃度を 20%、16%、12%、8%、4% および 2% に調整した混合ガスを調製し、各恒温庫に配置した 6 個の密閉チャンバーに個別に流入させた。いずれの場合においても O_2 以外のガスは窒素 (N_2) のみとした。各混合ガスを、蒸留水を入れたガラス瓶を通し

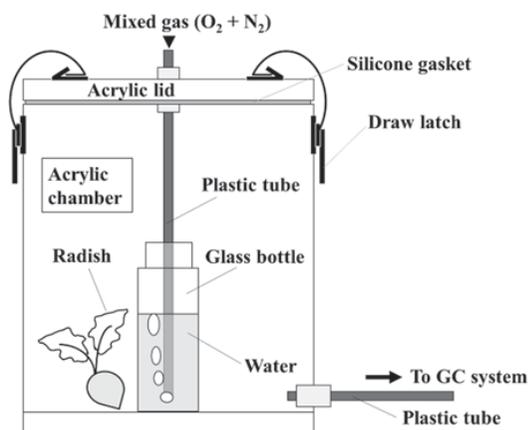


Fig. 1. Details of gas-tight chamber with gas inlet and outlet used for storage and to measure radish respiration.

てチャンバー内に流入（流速は 0.1 L min⁻¹）させることで湿度を維持した（推定相対湿度 99%以上）。貯蔵試験は 6 日間行った。

2.3 呼吸速度の測定

1 時間ごとに各チャンバー内の O₂ および CO₂ 濃度を自動測定式ガスクロマトグラフィシステム（GC2014、島津製作所）により測定し、二酸化炭素生成速度（CO₂ mg kg⁻¹ h⁻¹）を算出し、これを呼吸速度とした。また重回帰分析により、呼吸速度に関する予測式の作成を試みた。温度および O₂ 濃度を説明変数とし、次式により両説明変数の呼吸速度への寄与程度を評価することとした。

$$R_{sp} = a_0 + a_1T + a_2O_2 \quad (1)$$

ここで、R_{sp} は呼吸速度（mg kg⁻¹ h⁻¹）、T は温度（℃）、O₂ は酸素濃度（%）、a₀ は定数、a₁ 及び a₂ は偏回帰係数である。

2.4 ハツカダイコンの品質調査

6 日後にチャンバーを開放し、チャンバー内の 10 個体から無作為に 4~5 個体を取り出し、根茎色、根茎からの細根の発達程度および葉色を調査した。根茎色は、ビジュアルアナライザー（IRISVA400、アルファ・モスジャパン）を用いて、LED ライトを光源に撮影したデジタル画像を画像解析ソフト（AlphaSoft、アルファ・モスジャパン）により解析し、L*、a*、b*およびアントシアニンの分類の目安に用いられる⁵⁾ b*/a*を算出した。開始時の値は L*=30.9±1.2、a*=32.9±1.9、b*=19.1±1.2、b*/a*=0.58±0.01 であった。細根の発達程度は根茎色の調査に用いた個体について、目視により 0（無）、1（微）、2（少）、3

（中）、4（多）、5（甚）の 6 段階で評価し、2 以上は商品性が失われた状態とした。試験開始時は全て 0 であった。葉色については、葉緑素計（SPAD-502、コニカミノルタ）を用いて最も外葉の上部、中部、下部の 3 カ所について測定し、算出された平均の SPAD 値で表した。開始時の値は 38.7±3.0 であった。

2.5 統計処理

統計処理は、Statcel 4.0（オーエムエス出版）を用いて実施した。根および葉の色については連続変数であることから Tukey-Kramer 検定を用い、細根の発達程度については離散変数であることから Steel-Dwass 検定を用いた。いずれも有意水準 $p < 0.05$ とした。また、葉色変化と呼吸速度の関係を回帰分析により評価した。

3. 結果

3.1 呼吸速度に及ぼす影響

呼吸速度は温度および O₂ 濃度の違いにかかわらず通気 1 日後には平衡に達し、試験終了時まで安定して推移した。3 日後における温度および O₂ 濃度とハツカダイコンの呼吸速度の関係を Fig. 2 に示す。同じ O₂ 濃度で温度が異なる試験区を比較すると、O₂ 濃度 2%での呼吸速度は温度が低いほど小さく、5℃では 20℃の約 1/3 であった。O₂ 濃度 4~20%でも同様の傾向が認められ、5℃では 20℃の約 1/3~1/5 であった。一方、同じ温度で O₂ 濃度が異なる試験区を比較すると、5℃での呼吸速度は O₂ 濃度が 4~16%ではほぼ一定であったが、O₂ 濃度 2%では 16%の約 5/7 まで低下した。10℃での呼吸速度は O₂ 濃度の低下とともに緩やかに低下し、O₂ 濃度 2%では 20%の約 5/9 まで低下した。15 および 20℃で

の呼吸速度は O_2 濃度が 4~20% ではほぼ一定であったが、 O_2 濃度 2% では 20% の呼吸速度の約 2/3 まで低下した。なお、いずれの試験区においてもチャンバー開封時に異臭は認められなかった（データ省略）。

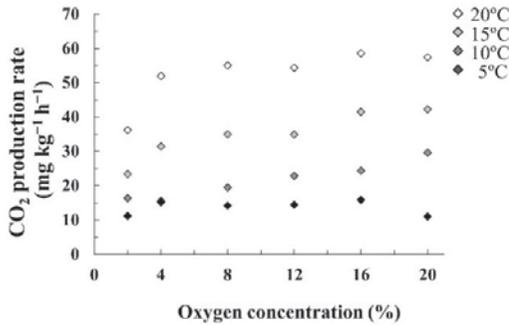


Fig. 2. Relationship between storage temperature and oxygen concentration effects on CO_2 production rate.

温度および O_2 濃度がハツカダイコンの根茎色に及ぼす影響を Fig. 3 に示す。根茎色は、いずれの試験区においても開始時と 6 日後を比較して明確な変化はほとんどなく、温度および O_2 濃度による違いが認められなかった。細根の発達程度は、同じ O_2 濃度で比較すると、 O_2 濃度 2% ではすべての温度において 2 以下、4~20% では 5°C および 10°C で 2 未満であったが、15°C および 20°C では 2 以上であった (Fig. 4)。また温度が低いほど細根の発達程度は小さく、すべての O_2 濃度において 5°C と 20°C との間で有意差が認められた。一方、同じ温度で比較すると、細根の発達程度は 5°C および 10°C ではすべての O_2 濃度において 2 以下であったが、15 および 20°C では O_2 濃度 2% で 1 を超え、 O_2 濃度 4%

3.2 根茎部の品質評価

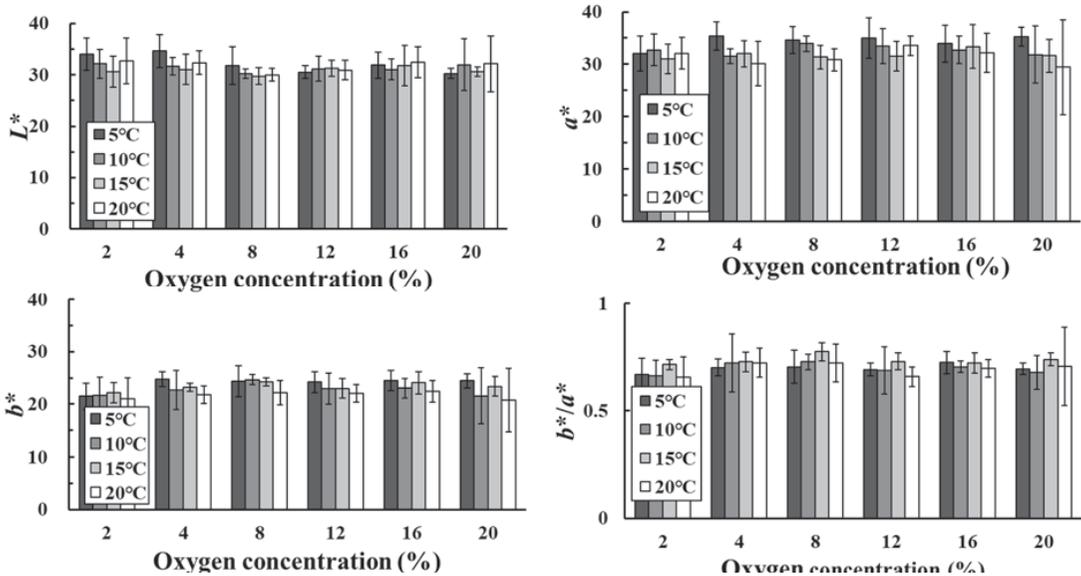


Fig. 3. Effects of storage temperature and oxygen concentration on radish root color (L^* , a^* , b^* and b^*/a^*). Error bars show standard deviation ($n = 4-5$). No significant difference was indicated according to Tukey-Kramer test ($p < 0.05$).

以上では2以上となったが、有意差は認められなかった。

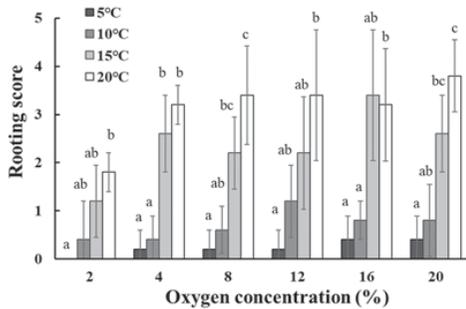


Fig. 4. Effects of storage temperature and oxygen concentration on development of radish rootlets. None (0), slight (1), a little (2), moderate (3), strong (4), and extensive (5). Error bars show standard deviation (n = 5). Different letters indicate significant differences between different temperatures and no significant difference is indicated between different oxygen concentrations according to Steel-Dwass test ($p < 0.05$).

3.3 葉色の評価

温度および O₂ 濃度とハツカダイコンの葉色に及ぼす影響を Fig. 5 に示す。同じ O₂ 濃度で比較すると、O₂ 濃度 2%における葉色 (SPAD 値) は 5°Cでは開始時の約 9/10であったが、20°Cでは開始時の約 1/10まで低下した。O₂ 濃度 4~20%においても同様の傾向を示し、すべての O₂ 濃度において SPAD 値は温度が高いほど低かった。O₂ 濃度が 2%では 5 と 10、15 および 20°C との間で、それ以外の濃度では 5、10、15 および 20°C のそれ

ぞれの間で有意差が認められた。同じ温度で比較した場合、5°Cおよび 20°Cにおいては O₂ 濃度による SPAD 値の違いは認められなかったが、10°Cおよび 15°Cでは O₂ 濃度が高いほど低い傾向が認められた。10°Cでは O₂ 濃度が 2%、15°Cでは O₂ 濃度が 2 および 4% の場合、SPAD 値は O₂ 濃度 12% 及び 16% の場合と比較して高かった。

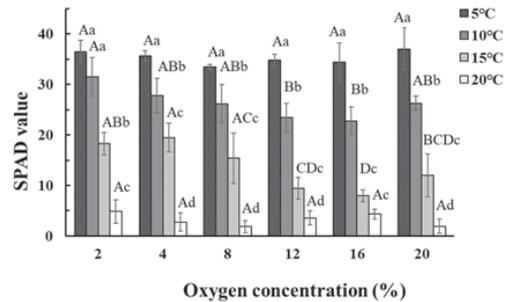


Fig. 5. Effects of storage temperature and oxygen concentration on radish leaf green. Error bars show standard deviation (n = 5). Different large letters indicate significant differences between different oxygen concentrations and different small letters indicate significant differences between different temperatures by Tukey-Kramer test ($p < 0.05$).

4. 考察

4.1 呼吸速度に及ぼす影響

呼吸速度は収穫した青果物の生理活性を知るうえで重要な指標であり、品質を保持するためには呼吸を抑制する必要がある²⁾。青果物の呼吸速度は、低温および低 O₂ により抑制される^{2) 6) 7)}。そこでハツカダイコンの呼吸速度を目的変数とし、温度と O₂ 濃

度を説明変数とした重回帰分析法により、要因分析を行った。求めた重回帰分析式の定数 (a_0)、偏回帰係数 (a_1, a_2) 及び重相関係数 (R) を **Table 1** に示す。また **Fig. 6** に呼吸速度の予測値と実測値の関係を示す。予測値と実測値には高い相関が認められた。さらに温度および O_2 濃度が低いほど呼吸速度が抑制されることが示された。低温および低 O_2 はいずれもハツカダイコンの生理活性を抑え、品質保持に有効であることが示唆された。また、温度および O_2 濃度の偏回帰係数を考慮すると、本研究での温度および酸素濃度範囲内かつそれらが一定の場合、理論上、温度 1°C の変化が呼吸速度に及ぼす影響は O_2 濃度 1% の約 4 倍であることが示された。

低温による呼吸抑制について、 10°C あたりの呼吸速度の上昇率 (Q_{10}) が同じ O_2 濃度では $1.9\sim 3.8$ であったことから、 10°C の低下で呼吸を約 $1/2\sim 1/4$ まで抑制できることが明らかとなった。一方、低 O_2 による呼吸抑制は、 10°C および 15°C において O_2 濃度 2% で 20% の約 $1/2$ であった。本試験ではいずれの温度においても O_2 濃度 2% では異臭は感じられなかった。これは連続通気を行ったことに起因していると思われる。しかし、一般的に青果物の嫌氣的呼吸を避けるうえで O_2 濃度は $1\sim 3\%$ 以上に保つ必要があるとされている⁸⁾。従って、低温および低 O_2 はともに呼吸を抑制するが、嫌気呼吸のリスクを勘案すると低温の方が低 O_2 よりも実用的であるといえる。

Table 1. Constants, regression coefficients, and correlation coefficients of the multiple regression equation.

a_0	a_1	a_2	R
-8.43	2.58	0.64	0.96

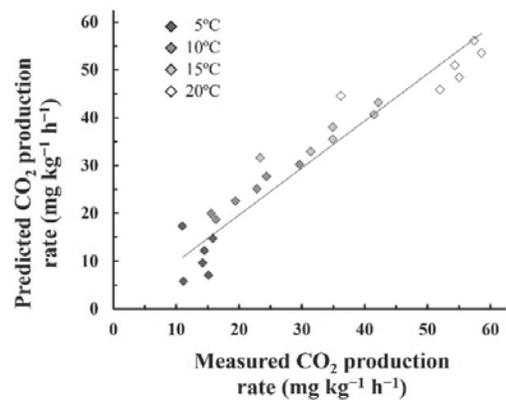


Fig. 6. Measured versus predicted values of respiration rate of radish.

4.2 根茎部の品質変化と温度および O_2 濃度の関係

赤系のハツカダイコンに含まれる色素は、ペラルゴニジンを中心とするアントシアニンであり⁵⁾、イチゴやナスの果実に含まれるアントシアニンに比べて温度変化に対する化学的安定性が高い⁹⁾。また、高 CO_2 は貯蔵中のリンゴのアントシアニンを不安定化させるが、低 O_2 は影響を及ぼさない¹⁰⁾。従って、本試験において根茎色に温度および O_2 濃度による違いが認められなかったことは、含まれるアントシアニンの化学的安定性が高く、低 O_2 により影響を受けなかったためと推察された。

細根の発達は、根菜において外観品質を損なう現象であり、ナガイモでは低温により貯蔵中の細根の発達が抑制される¹¹⁾。本研究において細根の発達は、O₂濃度にかかわらず、5℃および10℃で少なく、低温により抑制される傾向を示した。一方、低O₂による抑制効果は認められず、20℃における2% O₂では、細根の発達程度は5℃や10℃よりも大きく、商品性がほとんど失われた状態であった。従って、根茎部の品質保持には10℃以下の低温保存が必要であると考えられた。

4.3 葉色の変化と温度およびO₂濃度の関係

ブロッコリー、葉ネギでは、呼吸が抑制されるとクロロフィル含量の低下が抑えられる^{12)、13)}。また、ハウレンソウでは黄化の進行と糖含量の減少が関わっており、呼吸を抑制し、糖含量を保持することによって、葉色が維持されることが報告されている⁶⁾。

Fig. 7 にハツカダイコンの葉色と呼吸速度の関係を示す。葉色 (SPAD) は、呼吸速度を説明変数とした単回帰式 (式 (2)) で表された。

$$\text{SPAD} = -0.76R_{\text{sp}} + 42.72 \quad (2)$$

相関係数 R は 0.95 となり、葉の変色 (緑の退色または黄化の進行) と呼吸速度には高い負の相関が認められた。このことから、ハツカダイコンの葉色は呼吸速度と密接な関係があり、呼吸を抑制することで葉の変色を抑えられることが明らかとなった。先に述べたとおり、呼吸速度の抑制には、低O₂よりも低温のほうが効果的であり、5℃ではO₂濃度

に関わらず葉色が保持された。20℃ではO₂濃度2%で呼吸の抑制効果が認められたものの、糖などの呼吸基質の積算消費量が大きくなり、葉の変色につながったと推察された。また、10℃ではO₂濃度2%、15℃では2%および4%で葉の変色が抑制されたが、15℃では2%でもSPAD値が保存開始時の約半分であり、黄化により商品性が失われた状態であった。以上のことから、葉色の保持には10℃以下の低温が必要なことが明らかになった。

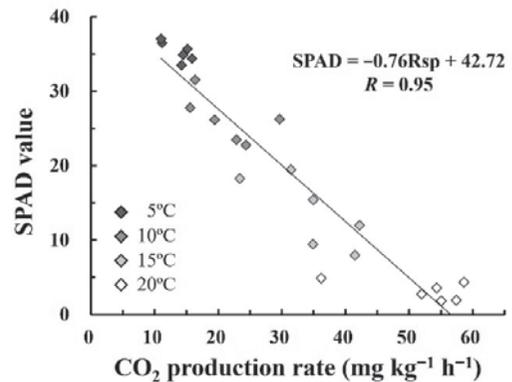


Fig. 7. Relationship between the respiration rate and the change of SPAD value of radish leaf.

5. 結論

本研究では、温度とO₂濃度の違いが、葉が付帯したハツカダイコンの外観品質に及ぼす影響を6日間の貯蔵試験により調査した。

呼吸速度はO₂濃度および温度を説明変数とした重回帰式で、葉色は呼吸速度による回帰式で表され、低温および低O₂はハツカダイコンの生理活性を抑え、品質保持に有効であることを確認した。一方、低O₂による品質保持効果は低温に比べて小さく、商品性を保持するには10℃以下の低温が必要である

ことを明らかにした。これらの知見は、予冷条件の策定や包装における断熱あるいはガス透過設計など、実用的な貯蔵条件を確立するうえで有用な情報と考えられる。

なお、青果物の MA 包装設計においては、低 O₂ と同時に高 CO₂ が品質に影響を及ぼすため、CO₂ 濃度がハツカダイコンの品質に及ぼす影響について今後検討する予定である。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の依頼研究員受け入れ制度で実施されたものであり、ご指導・ご支援を賜りました食品研究部門・食品流通システムユニット（当時）の皆様には深謝いたします。

<参考文献>

- 1) S. C. Fonseca, F. A. R. Oliveria, J. K. Brecht, Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review, *J. Food Eng.*, **52**(2), p.99 (2002)
- 2) 壇和弘, 永田雅靖, 山下市二, 数種の野菜の呼吸に及ぼす低酸素の影響 (II), *日本食品低温保蔵学会誌*, **21**(3), p.127 (1995)
- 3) 農林水産省, 地域特産野菜生産状況調査 2018 年 (2020)
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokusan_yasai/ (2021 年 12 月 21 日確認)
- 4) USDA, The Commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks, p.524 (2016)
- 5) 加藤一幾, 佐藤和成, 金澤俊成, 庄野浩資, 小林伸雄, 立澤文見, ダイコン類 (*Raphanus sativus* L.) における根色とアントシアニン, *園芸学研究*, **12**(3), p.229 (2013)
- 6) 日坂弘行, ホウレンソウ貯蔵中における呼吸量, 糖含量の変化と外観の劣化との関係, *日本食品工業学会誌*, **36**(12), p.956 (1989)
- 7) D. Zagory, A. A. Kader, Modified atmosphere packaging of fresh produce, *Food Technol.*, **42**(9), p.70 (1988)
- 8) A. A. Kader, Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables, *Food Technol.*, **40**(5), p.99 (1986)
- 9) K. Hayashi, N. Ohara, A. Tsukui, Stability of anthocyanins in various vegetables and fruits, *Food Sci. Technol. Int.*, **2**(1), p.30 (1996)
- 10) T. Y. Lin, P. E. Koehler, R. L. Stability of anthocyanins in the skin of Starkrimson apples stored unpackaged, under heat shrinkable wrap and in - package modified atmosphere, *J. Food Sci.*, **54**(2), p.405 (1989)
- 11) 弘中和憲, 石橋憲一, ナガイモの貯蔵に関する研究 (第 1 報) 貯蔵温度および包装方法がナガイモの品質におよぼす影響, *農業機械学会誌*, **53**(3), p.75 (1991)
- 12) 池田浩暢, 石井利直, 茨木俊行, 太田英明, MAP 条件が 15℃ 貯蔵中のブロッコリー (*Brassica oleracea* var. *italica*) の

品質に及ぼす影響, 日本食品保蔵科会誌,
30(3), p.137 (2004)

(原稿受付 2021年10月8日)

(採録受理 2022年1月6日)

- 13) 茨木俊行, 池田浩暢, 太田英明, いくつか
の雰囲気ガス濃度組成が葉ネギの鮮度保
持に及ぼす影響, 日本食品保蔵科会誌,
23(1), p.3 (1997)

