二酸化炭素濃度と温度がコマツナの食味へ与える影響

宮沢佳恵*・岡田益己**

(* 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター)

** 岩手大学農学部

Effects of CO₂ concentration and temperature on eating quality of komatsuna

Kae MIYAZAWA*, and Masumi OKADA**

(*National Agricultural Research Center for Tohoku Region, 50 Harajuku-minami, Arai, Fukushima 960–2156, Japan)

(**Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020–8550, Japan)

Abstract

The authors investigated the effects of CO₂ concentration and temperature on the eating quality of komatsuna (*Brassica rapa* var. *peruviridis*). The komatsuna was grown in two temperature-gradient chambers at three temperature levels averaging 18.9, 21.9, and 23.0°C. One of the chambers was used to produce an elevated ambient atmospheric CO₂ concentration of 200 ppm. Among the six sensory quality factors evaluated by a ten-member panel, the sweetness rating and overall rating were significantly lower in samples grown under elevated CO₂ compared to those grown under ambient CO₂, regardless of the temperature regime. It is possible that the taste and nutritional quality of leafy vegetables could decline in future CO₂ concentrations.

Key words: Nitrogen content, SLA, Sweetness, Temperature gradient chamber.

キーワード: 甘さ, SLA, 温度勾配チャンバー, 窒素含有量

1. はじめに

大気中の CO₂ 濃度上昇により, 多くの植物の生育や収量が増加することが知られている (Drake *et al.*, 1997; Terashima, 2003)。これは, 植物の炭素固定酵素であるリブロース 1, 5-ビスリン酸カルボキシラーゼ / オキシゲナーゼ (Rubisco) が現在の大気 CO₂ 濃度では飽和せず, CO₂ が光合成の律速要因となっているためである。また, C3 植物で顕著にみられる光呼吸が, 大気中の CO₂ 濃度上昇により抑えられるためでもある。光呼吸は CO₂ の代わりに O₂ が拮抗的に Rubisco に結合して引き起こされるもので, 炭素固定を阻害するだけでなく, エネルギーと炭素同化物を消費し, 炭素同化効率を顕著に低下させる。したがって, 大気中 CO₂ 濃度が上昇すると, 植物の炭素同化速度および炭素同化効率が増加し, バイオマスが増加する。

大気中の CO₂ 濃度が上昇すると, バイオマスが増加するだけでなく, 植物体の糖含有量も増加する (Drake *et*

2010 年 7 月 30 日 受付, 2010 年 9 月 28 日 受理

al., 1997)。寒締めホウレンソウの場合, 糖含有量が多いほど, 食味の「甘さ」の評価が高く, 食味が良いとされた (Shishido, 2008)。したがって, 高 CO₂ 濃度条件下で糖含有量が増加するならば, 葉菜類の食味の評価が向上する可能性があるが, 著者らの知る限りこれまでのところ葉菜類の食味への影響に関しては報告がない。また, 糖含有量の他にも葉の形態的・成分的な変化が起きることが予想されることから, CO₂ 濃度の影響が全体として食味にどのような影響を与えるかはわからない。そこで, 本試験では通年ハウスで広く栽培されているコマツナを対象とし, CO₂ 濃度上昇が食味に与える影響を調査した。また, 高 CO₂ 濃度に対する植物の反応は温度条件によって大きく左右されるため (Drake *et al.*, 1997), 温度条件を変え, CO₂ 濃度との複合的な影響を調査した。

2. 実験方法

2.1 CO₂ 濃度および温度処理

東北農業研究センターの複合制御人工気象施設 (グラディオトロン) を 2 棟用いて試験を行った。1 棟は外気と

Fig. 1. CO₂ concentration (a) and temperature (b) in the temperature gradient chambers during the experimental period.

同じ CO₂ 濃度, もう 1 棟は外気 CO₂ 濃度よりも常に 200 ppm 高くなるように通気量に連動して CO₂ ガスを供給した (Fig. 1a)。本報告では便宜的に前者を「標準 CO₂」, 後者を「高 CO₂」処理と呼ぶ。グラディオトロン内の温度は, 各棟とも入口から出口にかけて最大 8℃の温度勾配が得られるため (Okada *et al.*, 1995), 入口から 4 m, 13.5 m, 22 m の位置を使用し, それぞれ「低温」, 「中温」, 「高温」処理とした (Fig. 1b)。実験期間中の平均気温は低温, 中温, 高温処理でそれぞれ 18.9, 21.9, 23.0℃であった。各位置について, 棟間の温度の違いはほとんど認められなかった。

2.2 栽培方法

園芸用育苗箱 (45 × 30 cm, 深さ 91 mm) に遮根シートを敷き, 風乾した腐植質黒ボク土を 9 kg 充填して栽培を行った。育苗箱あたり化成肥料 6 g (複合燐加安, N-P-K = 12-18-16) を施肥し, コマツナ (品種: みすぎ) を 2003 年 6 月 25 日に 2 粒ずつ 24 ケ所に播種し, 発芽が揃うまで中温処理位置に 2 日間設置した。発芽後, 間引いて育苗箱あたり 24 個体を残し, 育苗箱をそれぞれの温度処理の位置に移動させた。それぞれの処理について 2 反復 (2 育苗箱) とした。灌水は, 毎朝 9 時に行い, 土壌表面が乾燥しているものについて育苗箱の底面から水が染み出すまで行った。灌水頻度は生育時期および温度処理により異なり, 週 2 ~ 6 回程度であった。収穫は, 草

丈がおおよそ 20 cm 以上となった 7 月 22 日 (播種後 27 日目) に行った。

2.3 食味試験

各 6 個体を午前 11 時に収穫し, ただちに処理毎に沸騰した湯で 1 分間茹で, ザルに取り冷水を 15 秒掛け流した後, 手で水分を絞り, 包丁で 3 cm 幅に切断した。各処理について反復サンプルを混ぜ, 全部で 6 サンプル (2 [CO₂ 濃度] × 3 [温度処理]) とし, 10 名のパネルを用いて, 外観, 味 (風味), 食感 (口当たり), 香り, 甘み, 総合の 6 項目を 5 段階で評価した。5 段階評価は「良い」, 「やや良い」, 「普通」, 「やや悪い」, および「悪い」とし (甘さについては「強い」, 「やや強い」, 「普通」, 「やや弱い」, および「弱い」に読み替え), それぞれ 4, 3, 2, 1, および 0 の点数に換算して解析を行った。

2.4 収穫調査

上記のサンプルとは異なる各 6 個体を収穫し, 新鮮重を測定した。葉面積は, ランダムに選択した各 3 個体について, 子葉以外の葉身を自動面積計 (AAM-9, 林電工) で測定した。それぞれの収穫した個体全てを 70℃で 2 日間乾燥し, 乾物重を計測した後, 粉碎し, 全自動元素分析装置 (varioMAX, Elementar Analytical) で窒素および炭素含有量を測定した。

2.5 統計処理

処理および処理の交互作用の検定は, 統計処理ソフト SAS 9.1 (SAS Institute Inc.) の Mixed プロシジャを用いて 2 元配置分散分析で行った。温度の処理間の有意差は Tukey の多重比較法により行った。

3. 結果

甘さ, および総合の 2 項目について処理間で有意差が認められた (Table 1, Fig. 2)。いずれも標準 CO₂ 処理で評価が高かった。その他の食味の項目に関しては有意な差は認められなかった。

収穫時のコマツナの新鮮重は, 温度処理で有意な差が認められ, 特に中温処理で低下した (Table 1, Fig. 3)。乾物重では CO₂ 処理と温度処理の両方で有意差が認められた (Table 1)。高 CO₂ 処理で乾物重は大きく, また低温処理で大きかった (Fig. 4)。収穫時の specific leaf area (SLA; 葉面積 / 葉重) は 5% 水準では有意差が認められなかったが, 10% 水準では高 CO₂ 処理で小さく, 葉の充填密度が大きい傾向が認められた (Table 1, Fig. 5)。また, 高温に比べて低温で小さくなっており, 低温で葉の充填密度が大きい傾向が認められた (Table 1, Fig. 5)。窒素含有量は CO₂ 処理と温度処理の両方で有意差が認められ, 高 CO₂ 処理で低く, また低温処理で低くなった (Table 1, Fig. 6)。炭素含有量は 10% 水準ではある

Table 1. Probabilities (*P*-values) from two-way ANOVA. The *p*-values exceeding 0.1 were indicated as “n.s.”

	Sweetness	Total Impression	Fresh weight	Dry weight	SLA	Nitrogen concentration	Carbon concentration
Factor							
CO ₂ concentration (C)	0.0446	0.0375	n.s.	0.0230	0.0693	0.0007	0.0627
Temperature (T)	n.s.	n.s.	0.0354	0.0076	0.0763	0.0012	n.s.
C×T	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Fig. 2. Sweetness (a) and total impression (b) of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures. The error bar represents the standard deviation (n=10). **Fig. 3.** Fresh weight of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures. Different alphabets indicate that the values differ significantly among temperature treatments (*p*<0.05). **Fig. 4.** Dry weight of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures. Different alphabets indicate significant difference among temperature treatments (*p*<0.05).

が高 CO₂ 処理で高くなった (Table 1, Fig. 7).

全ての測定項目において CO₂ 処理と温度処理の間に交互作用はなく、本試験の温度条件範囲ではコマツナの CO₂ 処理に対する反応に温度処理による違いは認められなかった。

4. 考 察

高 CO₂ 条件下では、植物の生育が増加するとともに葉や果実の糖含有量が増加することが数多く報告されている

(Rowland-Bamford *et al.*, 1996; Reddy *et al.*, 1998a; Reddy *et al.*, 1998b, Wang *et al.*, 1999; Prasad *et al.*, 2004; Wang and Bunce, 2004; Krumbein *et al.*, 2010)。本試験でも、高 CO₂ 処理により乾物重が増加したことから、糖含有量が増加していた可能性が考えられる。さらに、高 CO₂ 条件下では窒素含有量が低下することが知られている (Drake *et al.*, 1997)。これは主に植物体のタンパク質の 25 ~ 50% を占める Rubisco の量が減少するためであるが (Drake *et al.*, 1997; Bloom, 2009),

Fig. 5. Specific leaf area (SLA) of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures. Different alphabets indicate significant difference among temperature treatments ($p < 0.1$).

Fig. 6. Nitrogen concentration of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures. Different alphabets indicate significant difference among temperature treatments ($p < 0.05$).

その要因として、糖やデンプンの増加による光合成関連の遺伝子発現の阻害が考えられている (Drake *et al.*, 1997; Koike, 2003)。本試験でも、高 CO₂ 処理で窒素含有量が低下したこと、炭素含有量が増加したこと、葉の充填密度が増加したことなどからも、糖やデンプン含有量が増加していた可能性が考えられる。

当初本試験では、高 CO₂ 条件下で糖含有量が増加することで、コマツナの甘さが増加し食味が向上することを予想していたが、食味試験の評価では逆に甘さの評価が下がり、その影響を受けて総合評価も同様に下がるという結果となった。しかし翻って考えると、そもそも果実とは異なり糖以外の成分を多く含む葉菜類では、糖含有量が直接甘さの指標になるとは限らないため (Takahashi, 1970; Horie, 2005)、糖含有量自体が増加していたとしても、それが甘みの評価と結びつかない可能性が大いに

Fig. 7. Carbon concentration of komatsuna grown under combinations of different CO₂ concentrations and temperatures.

ある。また、糖含有量の増加が報告された上記の事例では、葉が食用ではない植物が主であり食味試験を行っていないため、高 CO₂ 条件による糖含有量の上昇が、味覚で感知できる程度のものであるかどうかはわかっていない。

一方、コマツナの甘みは糖ではなく、アミノ酸が大きく関与しているという報告が近年示された (Mori, 2008)。高 CO₂ 処理では窒素含有量が低下していたことから、アミノ酸含有量も低下していたことが推測される (Stitt and Krapp, 1999)。生育中の高 CO₂ 条件により窒素含有量が低下する場合、Rubisco だけではなく硝酸態窒素やアミノ酸含有量も低下し、アミノ酸の中では特にグルタミン、グリシン、およびセリンが減少することが報告されている (Stitt and Krapp, 1999)。特にグリシンとセリンは甘みを呈するものとして分類されるアミノ酸であるが (Takahashi *et al.*, 2006)、この 2 種の特異的な減少は高 CO₂ 条件による光呼吸の減少に伴うものであると考えられている (Geiger *et al.*, 1998)。本試験において高 CO₂ 条件で甘みや総合評価が低下した一つの要因として、これらのアミノ酸含有量の低下が関与していた可能性があり、さらなる検証が必要である。

また、温度処理に関しても、窒素含有量が低下した低温処理において、統計的有意差は検出されなかったものの甘みの評価の平均値が低い結果となった。温度は光呼吸速度にも影響を与えることが知られており、温度が高いほど O₂ に対する CO₂ の溶解度および Rubisco への親和性が低くなるため、光呼吸の割合が増加する (Drake *et al.*, 1997)。したがって、低温処理でも高 CO₂ 条件同様、光呼吸が抑制されて甘みに関わるアミノ酸含有量が減少した可能性が考えられるが、これについても今後の検討課題である。また、温度処理によって生育量や蒸散量が異なり、灌水頻度も同一ではなかったことから、本試験の温度処理の効果には温度そのものの要因以外に生育量や

養水分供給量が関与していた可能性も否定できない。本試験では土耕栽培における CO₂ 濃度と温度の影響を総合的に調査したが、CO₂ 処理への反応に対する温度そのものによる違いについて厳密に検証するには、水耕栽培等により養水分供給量が温度による影響を受けにくい試験設定が必要である。

CO₂ 濃度の上昇による食味への影響は、米では調べられている。米の場合、窒素とタンパク質含有量が少ない方が食味が良いといわれているため (Matsue *et al.*, 1997), 子実の窒素含有量およびタンパク質含有量の減少により (Seneweera *et al.*, 1996; Lieffering *et al.*, 2004) 食味が良くなることが期待されたが、有意な差は認められなかった (Terao *et al.*, 2005)。したがって、CO₂ 濃度の上昇は食味を向上することではなく、逆にわれわれの主食であり重要なタンパク源でもある米の品質を下げると考えられる (Stafford, 2007; Bloom, 2009)。本試験でも、大気中 CO₂ 濃度の上昇による糖含有量の増加が報告されていることから、コマツナの食味が良くなることを予想していたが、逆に食味が悪化する結果を得た。大気中 CO₂ 濃度の上昇は、作物や野菜の増収をもたらす一方、品質や食味に関しては負の効果を与える可能性が懸念される。

5. 摘 要

CO₂ 濃度の上昇がコマツナの食味に与える影響を調べるため、外気 CO₂ 濃度および外気 + 200 ppm の CO₂ 濃度のもとでコマツナを栽培し、食味試験を行った。また、CO₂ 濃度の効果には温度が大きな影響を与えることが知られていることから、3 レベルの温度処理を組み合わせ、試験を行った。コマツナの食味試験の結果、甘さおよび総合評価は、高 CO₂ 濃度処理で低下した。高 CO₂ 濃度処理では乾物重および葉の充填密度が増加し、窒素含有量が低下していた。また、低温では高 CO₂ 濃度処理と同様に、コマツナの乾物重および葉の充填密度が増加し、窒素含有量が低下した。しかし、温度処理はコマツナの CO₂ 濃度処理への反応に影響を与えなかった。高 CO₂ 濃度処理による食味の悪化にはアミノ酸含有量の影響が考えられるが、今後更なる検討が必要である。

References

Bloom, A. J., 2009: As carbon dioxide rises, food quality will decline without careful nitrogen management. *California Agric.*, **63**, 67–72.
 Drake, B. G., González-Meler, M. A., and Long, S. P., 1997: More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? *Annu. Rev. Plant.*

Physiol. Plant. Mol. Biol., **48**, 609–639.
 Geiger, M., Walch-Piu, L., Harnecker, J., Schulze, E.-D., Ludewig, F., Sonnewald, U., Scheible, W.-R., and Stitt, M., 1998: Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity in older plants, and a large stimulation of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in young tobacco plants. *Plant Cell Environ.*, **21**, 253–268.
 Horie, H., 2005: The present and the future of the quality evaluation of vegetables. *Proc. Veg. Tea Sci.*, **3**, 123–128.
 Koike, T., 2003: Fluctuation of global environment and plant: responses to high CO₂ environment. In *Introduction to Plant Physiological Ecology* (ed. by Muraoka, H., Kachi, N.). Bun-ichi Sogo Shuppan Co., Tokyo, pp. 119–140. (小池孝良, 2003: 地球環境変動と植物: 高 CO₂ 環境への応答, 光と水と植物の形: 植物生理生態学入門 (村岡裕由, 可知直毅編). 文一総合出版, 東京, pp. 119–140.).
 Krumbein, A., Klaring, H. P., Schonhof, I., and Schreiner, M., 2010: Atmospheric carbon dioxide changes photochemical activity, soluble sugars and volatile levels in Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *J. Agric. Food Chem.*, **58**, 3747–3752.
 Lieffering, M., Kim, H.-Y., Kobayashi, K., and Okada, M., 2004: The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains. *Field Crops Res.*, **88**, 279–286.
 Matsue, Y., Odahara, K., and Hiramatsu, M., 1997: Studies on palatability of rice in northern Kyushu. VIII. Nitrogen fertilizer and zeolite application for improving the eating-quality of rice produced on Andosol paddy field. *Jpn. J. Crop Sci.*, **66**, 189–194.
 Mori, K., 2008: Re-found the taste of Komatsuna (*Brassica rape* L.). *J. Agric. Sci.*, **63**, 33–41.
 Okada, M., Hamasaki, T., and Hayashi, T., 1995: Temperature gradient chambers for research on global environment change. I. Thermal environment in a large chamber. *Biotronics*, **24**, 85–97.
 Prasad, P. V. V., Boote, K. J., Vu, J. C. V., and Allen, L. H., 2004: The carbohydrate metabolism enzymes sucrose-P synthase and ADG-pyrophosphorylase in phaseolus bean leaves are

- up-regulated at elevated growth carbon dioxide and temperature. *Plant Sci.*, **166**, 1565–1573.
- Reddy, A. R., Reddy, K. R., and Hodges, H. F., 1998a: Interactive effects of elevated carbon dioxide and growth temperature on photosynthesis in cotton leaves. *Plant Growth Regul.*, **26**, 33–40.
- Reddy, K. R., Robana, R. R., Hodges, H. F., Liu, X. J., and McKinion, J. M., 1998b: Interactions of CO₂ enrichment and temperature on cotton growth and leaf characteristics. *Environ. Exper. Bot.*, **39**, 117–129.
- Rowland-Bamford, A. J., Baker, J. T., Allen, L. H., and Bowes, G., 1996: Interactions of CO₂ enrichment and temperature on carbohydrate accumulation and partitioning in rice. *Environ. Exper. Bot.*, **36**, 111–124.
- Seneweera, S., Blakeney, A., Milham, P., Basra, A. S., Barlow, E. W. R., and Conroy, J., 1996: Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus on the grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* cv. Jarrah). *Cereal Chem.*, **73**, 239–243.
- Shishido, T., 2008: Sugar contents of winter spinach and estimation of sugar. *Tohoku Agric. Res.*, **61**, 185–186.
- Stafford, N., 2007: Future crops: the other greenhouse effect. *Nature*, **448**, 526–528.
- Stitt, M., and Krapp, A., 1999: The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: The physiological and molecular background. *Plant Cell Environ.*, **22**, 583–621.
- Takahashi, K., 1970: Seasonal changes in sugar contents of cabbages. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.*, **39**, 318–324.
- Takahashi, A., Matsuda, Y., Komaba, C., Okushima, S., and Yoshida, K., 2006: Changes with cooking in the mineral, nitrate nitrogen and amino acid contents of komatsuna (*Brassica campestris* L. var. komatsuna Matsum.) grown under different soil conditions. *J. Cookery Sci. Jpn.*, **39**, 115–121.
- Terao, T., Miura, S., Yanagihara, T., Hirose, T., Nagata, K., Tabuchi, H., Kim, H.Y., Lieffering, M., Okada, M., and Kobayashi, K., 2005: Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. *J. Sci. Food Agric.*, **85**, 1861–1868.
- Terashima, I., 2003: Leaf photosynthesis: light and CO₂ environment within leaf. In *Introduction to Plant Physiological Ecology* (ed. by Muraoka, H., Kachi, N.). Bun-ichi Sogo Shuppan Co., Tokyo, pp. 85–118. (寺島一郎, 2003: 葉の光合成: 葉の内部の光環境とCO₂環境, 光と水と植物の形: 植物生理生態学入門 (村岡裕由, 可知直毅編). 文一総合出版, 東京, pp. 85–118.).
- Wang, S. Y., and Bunce, J. A., 2004: Elevated carbon dioxide affects fruit flavor in field-grown strawberries (*Fragaria* × *ananassa* Duch). *J. Sci. Food Agric.*, **84**, 1464–1468.
- Wang, Z., Pan, Q., and Quebedeaux, B., 1999: Carbon partitioning into sorbitol, sucrose, and starch in source and sink apple leaves as affected by elevated CO₂. *Environ. Exper. Bot.*, **41**, 39–46.