

栽培方法の違いがレタスの品質に及ぼす影響

—栽培方法によってレタスが作り出す成分は味の違いにも現れる—

岡崎 聖一

株式会社キーストンテクノロジー 代表取締役社長・CEO
横浜国立大学大学院 環境情報学府 環境生命学専攻 博士後期課程

1. はじめに

気候変動に起因する自然災害は、2018年だけで約1000億ドル（約11兆円）に上る経済的損失を世界にもたらしたと示唆する報告書を、英ロンドンの国際援助団体「クリスチャン・エイド（Christian Aid）」が2018年12月27日に発表した。2018年の気温は記録史上4番目の高さとなる見通しで、世界の平均気温は産業革命前と比べて1度近く上がっている。大気中の二酸化炭素（CO₂）やメタンなどの温室効果ガスも増える一方で、今後は異常気象がどんどん当たり前になっていくと予想される。

同団体は、2018年に甚大な被害をもたらした十大気象災害を選出し、オープンデータや政府発表の推計、保険会社の査定をもとに、個々の災害の損害額を算出した。米カリフォルニア州で相次いだ山火事、欧州の干ばつ、日本の豪雨災害の4つは、経済的損失額がいずれも70億ドル（約7700億円）を超えた。また、2018年には人間が居住する地球上の大陸すべてで、少なくとも1回は気候変動に起因する大規模災害が発生していた¹⁾。

このような気象災害が原因となり、日本列島の広い範囲で農地が被害を受け、農業生産に悪影響を及ぼす事態が生じている。災害や天候不順により野菜が安定的に確保できないケースが増加するとともに、高齢農家の大量リタイアによる生産基盤弱体化も続いており、野菜を安定供給する体制が弱くなっている。それらの対抗策として、コン

ビニエンスストア各社が野菜工場からの調達を本格化させている。セブン-イレブン・ジャパンは2019年1月に専用野菜工場を稼働させるほか、ファミリーマートも工場栽培したレタスなど仕入れを始めた。工場産野菜は天候の影響を受けずに安定調達できるほか、生産者もコンビニ大手が大量に買い取ってくれることで投資リスクを減らすことができる。これらの動きは、近年伸び悩んでいた工場野菜が広まる契機になりそうだ²⁾。

今回は今後さらに普及が進むと考えられる植物工場産野菜と慣行農法産野菜の生産方法の違いに由来する品質の違いについて論じていきたい。

2. 植物生産に環境が及ぼす影響

植物工場は、一見構造が単純で、スチール棚に照明と水耕栽培用の部材を取り付ければ出来上がりと思われがちである。しかし、現実には厳しく、そのような簡便な方法により作られた栽培プラントでは採算性が低いのが実情である³⁾。従って、植物工場の普及・発展のためには、生産性および品質の向上が、重要かつ緊急の課題となっている。

それらの課題に対する具体的な解決策は、植物生産に影響を及ぼす環境要因を理解するところからは始めるべきである。植物生産に影響を及ぼす環境要因には、下記のようなものが挙げられる。

◇無機的（非生物的）環境要因

- ①温度要因（気温・水温・土壌温度）
- ②光要因（光の強さ・波長・日長など）
- ③大気要因（酸素濃度・二酸化炭素濃度・湿度・

気圧・風・浮遊粒子など)

④水要因 (降水量・土壌含水量・波や潮の干満・乾燥・酸性度 (pH)・塩分濃度など)

⑤土壌要因 (粒度・通気性・保水性・pH・塩類濃度など)

⑥その他 (重力・磁力・放射線量など)、

◇生物学的 (有機的) 環境要因

①種内関係 (同種の個体間) にある要因 (異性間の関係・親子間の関係・種内競争など)

②種間関係 (異種の生物間) にある要因 (捕食・寄生・共生など)

植物工場では、高度に調節された環境下で植物を生産できる。その一方、高額な設備投資とともにその運営にはランニングコストを要するため、生産の効率化と生産物の高付加価値化が不可欠である^{4)・5)}。このため、栽培密度、温度、光、培養液成分・濃度、二酸化炭素濃度、湿度など主要な環境条件を変動させて、生産性や付加価値機能を向上させる試みが、すでに多くなされている⁶⁾。

筆者らは、環境要因を人工的に制御することにより植物の潜在能力を最大限に引き出す栽培技術の確立を目指し、一連の研究を行っている。次節から、栽培方法の違いがレタスの品質に及ぼす影響について、2018年6月に公表された論文を用いて解説する。

3. 植物工場栽培のサニーレタスは旨み成分を多く含み、苦み成分が少ない～栽培環境による味の特徴を明らかに～

国立大学法人筑波大学生命環境系の草野都教授、国立研究開発法人理化学研究所および筆者らの研究グループは、RGB (赤色、緑色、青色) LED 独立制御型植物工場栽培したサニーレタスが、まったく同じ組成の液体肥料を用いて土壌栽培したものと比較したときに、見た目の違いだけでなく味や機能性などに関連する代謝物群の生産に影響することを、「統合メタボローム解析」により世界で初めて明らかにした⁷⁾。

◇掲載論文

Metabolomic Evaluation of the Quality of Leaf

平成31年3月号

Lettuce Grown in Practical Plant Factory to Capture Metabolite Signature

(実用植物工場で栽培したリーフレタス品質の評価)

◇著者名

Yoshio Tamura, Tetsuya Mori, Ryo Nakabayashi, Makoto Kobayashi, Kazuki Saito, Seiichi Okazaki, Ning Wang, and Miyako Kusano

<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00665> (Frontiers in plant science)

◇研究の背景

植物工場は、植物の生長に重要な要素である温度、湿度、光質、培養液等を制御し、閉鎖的環境下で生育することにより、天候に左右されない野菜の安定かつ安全な供給を可能にする。一方で、慣行農法産野菜に比べて生産コストが高いため、味や機能性成分等で付加価値を付与できるような、先進的な野菜栽培条件の検討が不可欠となっている。

本研究グループではこれまでに、商用植物工場に主として栽培されている葉物野菜のひとつであるリーフレタスについて、栽培時に用いるLEDの光質や光強度と有用代謝物の生産との関係を明らかにしてきた⁸⁾。本研究ではさらに、リーフレタスの品質について、土壌栽培のものと比較した際に代謝レベルでどのような差異があるのか、ガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC-MS) および液体クロマトグラフィー質量分析法 (LC-MS)

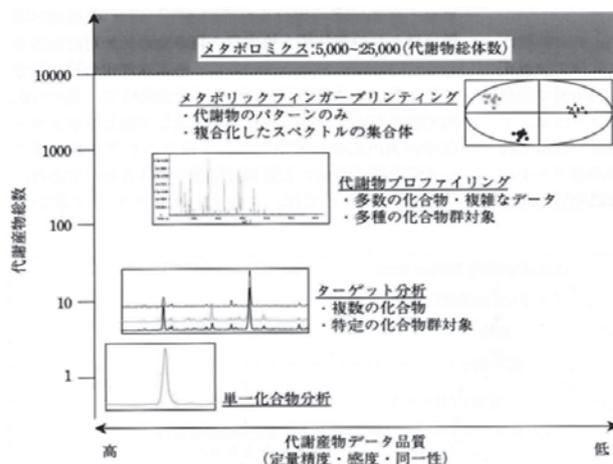


図1 代謝産物の適用範囲と代謝物分析のデータ品質に関する説明図⁹⁾

を用いた「統合メタボローム解析」を用いて明らかにするとともに、指標代謝物群の探索を行うことを目的とした⁷⁾。

本研究で用いた統合メタボローム解析とは、動物の生体内代謝物を質量分析計や核磁気共鳴(NMR)など複数の分析装置を用いて網羅的に測定し、生理学的に解釈する手法のことである⁹⁾。

近年 GC-MS などを利用した植物代謝成分の同定及び定量を同時に行える一斉分析及び解析手法が確立されつつあり、モデル植物を中心に研究が進展している⁹⁾。メタボロームという語は、ある生物の持つ全ての代謝産物(メタボライト)を表す。メタボロミクスは、異なる栽培環境が植物に及ぼす影響の特定や農産物の品質評価に使用されてきた。これまで作物品質の向上に資する研究は、数種類の重要な成分に標的を絞ってなされてきた。植物は未同定のものを含めると 100 万種以上の代謝産物を生合成すると推測されている¹⁰⁾。2007 年に行われた食品および植物中の機能性成分を含む二次代謝産物の検出を目的とした LC-MS ベースの代謝産物プロファイリングは、環境要因が茶中のフラボノイドの蓄積に影響することを明らかにした¹¹⁾。代謝産物プロファイリングは、予め標的とする成分を決めた後に行うターゲット分析とは異なり、多くのサンプルについてさまざまな成分プロファイルを返すため、味の特性の解明および農産物の機能評価のための有望な分析方法である⁹⁾。栽培条件の違いによって引き起こされる味覚関連代謝産物の変動を検出するだけでなく、野菜の特殊代謝産物の量的変化の特定にも貢献する。

本研究における異なる栽培システムからの葉のレタスの代謝産物変化データの収集は、それらの品質を明らかにするために非常に重要といえる。

◇研究内容と成果

本研究では、商業生産植物工場に準じた栽培条件を用いており、土壌栽培においても液体肥料の組成、光源の光強度をなるべく植物工場と同一となるように設

定した(表1)。このような条件のもと、リーフレタス 2 品種は、液体肥料の組成や光源の光強度の条件を揃えた土壌および植物工場で定植後 33 日間栽培した。使用した LED 光源の波長は、土壌栽培は白色(400~800 nm)、植物工場栽培は青色(460 nm)、緑色(525 nm)および赤色(660 nm)を使用した。栽培した植物体の外葉および中葉よりそれぞれサンプリングし、メタボローム解析(代謝物プロファイリング)を行った。また、収穫したリーフレタスに対して見た目(表現型)を観察した(図1)。

次に、それぞれの植物体の外葉および中葉をサンプルとして、GC-MS および LC-MS を用いた統合メタボローム解析を実施した。その結果、見た目について、植物工場栽培のリーフレタスは、土壌栽培のものと比較し、品種特有の褐色は観察できず、葉の形状も異なることがわかった(図2)。

また、メタボローム解析の結果、味に関連するアミノ酸や糖などの一次代謝物や機能性を有するような二次代謝物を含む約 300 個の代謝物が検出された。各サンプルの代謝物プロファイルの比較から、リーフレタスの葉の部位(中央、外側および、その中間の葉)による違いや品種の違いよりも、栽培環境の違いが代謝物組成に大きな影響を与えることが判明した。また、植物工場で栽培したサニーレタスは土壌栽培で栽培したものと比較し、旨味成分であるアミノ酸の含量が高く、レタス特有の苦味成分であるセキステルペン類の含量が低いことが明らかとなった(図3)。

表1 土壌および水耕栽培条件⁷⁾

Parameter	Soil	Hydroponics
LED light source wavelength (nm)	White (400-800)	Blue (460), green (525), red (660)
Light intensity (PPFD)*	140	150 (blue, 23%; green, 5%; red, 72%)
Liquid fertilizer (ppm)	NH ₃ -N, 0.50; NO ₃ -N, 25.00; P, 9.00; K, 56.00; Mg, 11.00; Mn, 0.05; B, 0.20; trace (Cu, Zn, Mo, Fe, Ca)	NH ₃ -N, 1.67; NO ₃ -N, 83.33; P, 30.00; K, 186.67; Mg, 36.67; Mn, 0.17; B, 0.67; trace (Cu, Zn, Mo, Fe, Ca)

*PPFD, photosynthetic photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

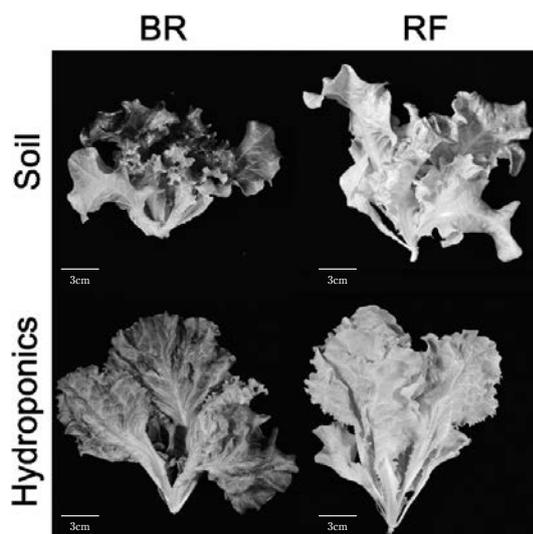


図2 2つの栽培条件下で栽培されたブラックローズ (BR) とレッドファイア (RF) のレタスの外観上の特徴⁷⁾。白いバーは、3センチを表す

◇今後の展開

これまで植物工場で栽培された野菜と屋外で土を使って栽培された野菜では、味や見た目が異なることは知られていた。本研究のように、野菜の成分そのものを直接比較することで、代謝物の種類や配合量と、ヒトの味覚との相関を知る手がかりを得ることができる。今後さらに、光質や液体肥料の組成等の違いと代謝物成分の関係について詳細に解析していくことで、野菜の味や機能性をカスタマイズする栽培条件を導き出すという、従来とは逆のアプローチによる新たな高付加価値農産物生産につながることを期待される¹²⁾。

4. おわりに

筆者は、LED 植物工場用栽培装置メーカーを

経営する立場から、味や機能性成分等で付加価値を付与できるような、先進的な野菜栽培条件の研究活動を行っている。研究の基本コンセプトは、「遺伝子に手を加えず、化学物質処理も行わず、如何にして植物の潜在能力を引き出すか」である。植物は、地上に根を張り、「移動できない」生存戦略を発達させながら繁栄してきた。すなわち、動けないからこそ、周囲の環境変化にしなやかに応答し、昆虫や菌類などと共生関係を営んでいる。それらをヒントに植物の潜在能力を引き出す具体的なアプローチとして、植物の生長に重要な要素である温湿度、光質、培養液等を制御し、閉鎖的環境下で生育することにより、慣行農法では真似のできない高付加価値、高い歩留まり率をデザインすることが可能であると筆者は確信している。

一方、上述したように植物は未同定のものを含めると100万種以上の代謝産物を生合成すると推測されているため、二次代謝産物の生合成に関する研究を従来型の予め標的とする成分を決めた後に行うターゲット分析では、予想した代謝メカニズムと異なる結果が得られた場合、実験計画からやり直すという時間と予算の無駄が生じて、研究者は頭を抱えることになる。筆者の経験の一つとして、スイートバジル (*Ocimum basilicum*) に含まれる香り成分を栽培光源の光質によって制御することを試みたことがある。筆者の開発した植物栽培用LED光源で生育したスイートバジルは、非常に香り高く、高級レストランのシェフから好評だったため、その香りの元を明らかにしたいと考えた。スイートバジルに多く含まれる香り成分

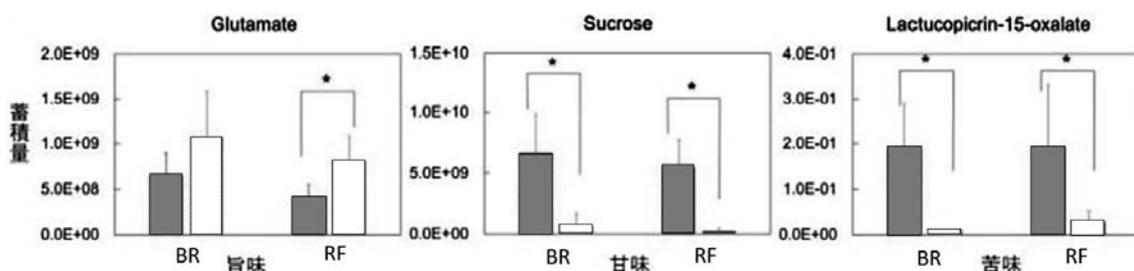


図3 栽培環境の違いがサニーレタスの見た目や味に及ぼす影響⁷⁾。ブラックローズ (BR) とレッドファイア (RF) について、メタボローム解析の結果から、栽培条件の違いで異なる蓄積パターンを示した味に関連した代謝物の一例を示す。棒グラフは、土壌栽培 (濃灰) と、植物工場 (白) で栽培された解析結果。縦軸は各代謝物の蓄積量を表す

を調べたところ、リナロール、 α -ピネン、 β -ピネンおよび1,8-シネオールの4種が絞り込めた。そこで、赤色光 (R) と青色光 (B) の光量比を3種類設定し生育、収穫したサンプルをガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC-MS) で分析し、対照区の市販スイートバジルに含まれる香气成分と比較した。結果は、4種香气成分において、RB比の異なる試験区間では、光質の違いが成分量に影響を及ぼす傾向が示された。しかしながら、いずれの試験区も市販のスイートバジルに対する有意差は観察できなかった。後日わかったことだが、スイートバジルに含まれる特徴的な香气成分は、上述した4成分の含有量は高いが、ヒトの嗜好として官能検査結果を左右するのは、他の成分であるということだった。従来型の予め標的とする成分を決めた後に行うターゲット分析はこの事例のように時として、期待外れになることがある。実際、科学の世界では、仮説の検証を目的として実験を行うので、仮説が誤っていれば、それが支持されない結果が出てくるのは自明である。質量分析計などの分析装置から得られる膨大な情報量のデータが多数のサンプル分積み上がった際に、その中からどのようにして目的とする成分をより分け見つけ出すことができるかが重要なポイントになる¹³⁾。

統合メタボローム解析手法により、動植物およびそこから派生する食品に係わる研究は大きく変化しようとしている。植物が生産する代謝物を網羅的に測定し、生理学的に解釈することにより、高機能性野菜研究テーマの選定から仮説立案まで、コペルニクス的大変革をもたらすことが期待される新技術である。さらに、植物が生産する代謝物を統合メタボローム解析手法により得られたデータをデータベースとして充実させると同時に、AIを組み合わせれば、従来30年かかっていた知見の獲得が10年に短縮できるかもしれない。

最後に、本研究プロジェクトに参加の機会を与えて頂いた国立大学法人筑波大学の草野都教授ならびに、研究成果をこのような形で発表することに同意頂いた論文共著者の皆様に感謝申し上げます。

<引用文献>

- 1) 2018年十大気象災害、のしかかる経済的損失と気候変動の影響報告. AFPBB News. <http://www.afpbb.com/articles/-/3204405>
- 2) 野菜工場、コンビニが再起、セブン、レタスを2000店向けに、大量購入を確約投資リスク低減 (ビジネス TODAY). 2018年11月29日日本経済新聞朝刊15面.
- 3) 佐藤光泰. (2011) 植物工場のビジネス化に向けて～植物工場の事業モデル確立に向けた7つのポイント～, 野村アグリプランニング&アドバイザー株式会社.
- 4) 次世代施設園芸地域展開促進事業 (全国推進事業) 事業報告書 平成29年. (2018). 大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例調査. 一般社団法人日本施設園芸協会.
- 5) Akita, M., and Suzuki, T. (2010). Biological and systems engineered approach for highly efficient and high-value-added production in plant factory system. *Memoirs of the Faculty of Biology-Oriented Science and Technology of Kinki University*, 26, 23-37.
- 6) 中野明正. (2016). 環境制御のための植物生理. 平成28年度次世代施設園芸地域展開促進事業 (全国推進事業) 高度環境制御技術研修用資料, 一般社団法人日本施設園芸協会.
- 7) Tamura, Y., Mori, T., Nakabayashi, R., Kobayashi, M., Saito, K., Okazaki, S., Wang, N. and Kusano, M. (2018) Metabolomic Evaluation of the Quality of Leaf Lettuce Grown in Practical Plant Factory to Capture Metabolite Signature. *Frontiers in Plant Science* 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00665>
- 8) Kitazaki, K., Fukushima, A., Nakabayashi, R., Okazaki, Y., Kobayashi, M., Mori, T., Nishizawa, T., Wo, S. R. C., Michelmor, R. W., Saito, K., Shoji, K and Kusano, M. Metabolic reprogramming in leaf lettuce grown under different light quality and intensity conditions using narrow-band LEDs. *Scientific Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25686-0>.
- 9) 草野都, & 齊藤和季. (2005). メタボロミクスの考え方と解析の概要. *化学と生物*, 43 (2), 101-108.
- 10) 岡崎圭毅, 建部雅子, 信濃卓郎, 岡紀邦. 代謝産物プロファイリングによる新規品質評価手法. 北海道農業研究センター 2008年の成果情報, <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/harc/2008/cryo08-27.html>
- 11) 水谷正治, 土反伸和, 杉山暁史. (2019). 基礎から学ぶ植物代謝生化学. ㈱羊土社, 東京.
- 12) 馬場健史. (2011). メタボロミクスの技術開発と応用. *生物工学会誌*, 第89巻, 第3号, 102-108.
- 13) 植物工場栽培のサニーレタスは旨み成分を多く含み, 苦み成分が少ない～栽培環境による味の特徴を明らかに～. 国立大学法人筑波大学, (株) キーストーンテクノロジー, 国立研究開発法人理化学研究所共同プレスリリース. 2018年6月27日.
- 14) 馬場健史. (2011). メタボロミクス研究成功の鍵はデータ解析. *Separation Sciences 2010 安全安心と快適を支える分離と検出の科学座談会要旨*.