

青果物の鮮度に関する収穫後生理学

1. はじめに

多くの食品の中で、青果物はどのような特徴があるのか、概観してみたい。我が国の農業総産出額は、92,025億円（2016年）である。そのうち、野菜（25,567億円）と果実（8,333億円）を合計した青果物の産出額は33,900億円で、農業総産出額全体の37%あまりを占めている（図1）¹⁾。青果物は、畜産（31,626億円、34%）と同規模で、コメ（16,549億円、18%）の約2倍である。コメは、低温による長期貯蔵が可能で、畜産物である肉は、冷凍による長期貯蔵が可能である。それに対し、青果物は、収穫後もひとつの生命体として生命活動を続けているため、低温においても、品質が急速に劣化することが多い。また、青果物は種類が非常に多く、それぞれの特性が多様であるため、全ての青果物にあてはまる品質保持条件は存在しない。現状では、5～10℃の、当たらずとも遠からずの条件を目途に、青果物の流通が行われている。

ふだん私たちが食事をする際、食品の流通を意識することはほとんどない。これは、食品を含めた様々な物流が、ごく当たり前のものになっているからであろう。しかし、例えば、九州産のイチゴや北海道産のスイートコーンを日本中で食べられるようになったことや、秋が収穫期のリンゴを年中いつでも食べられることの背景には、青果物の品種改良や栽培技術の開発以外に、食品流通技術の発展による時間的、距離的な障壁の克服がある。食品流通が、戦後、私たちのライフラインを支えるインフラストラクチャーとして、豊かな食生活の発展を支え続けてきたことに疑いはない。

上記のイチゴやスイートコーンは、生産と消費の場所に隔たりのある例であり、リンゴは、それに加えて、生産と消費の時間の隔たりをCA貯蔵（後述）という食品流通技術が解決した例である。流通は、生産と消費に時間的空間的な隔たりがあるかぎり、普遍的に必然となる手段といえる。人類の誕生以来、狩猟生活においても、その後の農

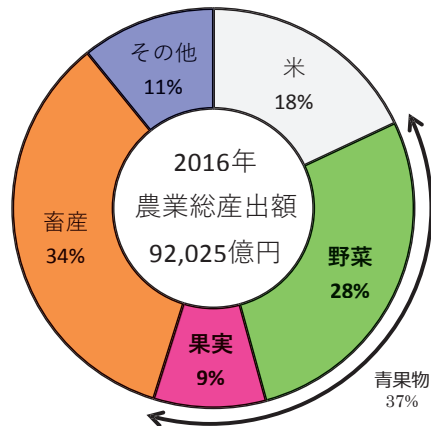


図1 2016年農業総産出額に占める青果物（野菜、果実）の割合

農業総産出額（平成28年）¹⁾をもとに作成。永田原図。

耕生活においても、食物の生産と消費の時空に隔たりがあるところでは流通の仕組みが必然的に発生するとともに、様々な要望に沿って発達し、それらが、貨幣経済など社会発展の原動力となっていくたのではないかと個人的には推察している。

ここでは、食品流通の中でも、とくに品質劣化が進みやすい青果物を対象に、鮮度という切り口で、収穫後（ポストハーベスト）の品質変化の生理機構解明と、その制御技術開発を見ていきたい。

2. 青果物とは

青果物とは、野菜、果実、山菜、きのこなどの総称である。しかし、野菜と果実、山菜等の分類は、使用する立場によって異なっているのが現状である。例えば、農林水産省では、主に栽培方法により分類している。野菜は、食用として栽培する一年生あるいは二年生草本である。多年生草本であっても、毎年苗を植えるイチゴは野菜に分類している。一方、果実（果樹）は、多年生の本木あるいは草本で、果実を食用とするものである。それに対して、文部科学省がまとめる日本食品標準成分表では、消費される場面を念頭に、スイカ、メロン、イチゴは、いずれも果実類に分類している。

日本では150種類を超える多様な野菜が食べられている。野菜は、利用される部位によって葉菜類、果菜類、根菜類に三大別されることが多い²⁾。葉菜類には、ホウレンソウ、コマツナ、レタス、キャベツ、ハクサイなどがある。これらは比較的呼吸が盛んなため呼吸基質を消耗しやすく、水分も失われやすい。果菜類には、キュウリ、ナス、ピーマンのように未熟な果実を食用とするものと、トマトやメロンのように成熟した果実を食用とするものがある。根菜類には、ダイコン、ニンジン、ゴボウ、レンコン等があり、一般的に呼吸速度が小さく比較的日持ち性も良い。

野菜として利用される時期と植物の生育ステージの関係を見てみると、発芽して間もないモヤシから、幼茎、展開葉、結球葉、花蕾、未熟果実、完熟果実、肥大根、さらには次の世代の種球になるような鱗茎や地下茎まで様々な植物器官が野菜として食用に供される（図2）³⁾。つまり、野菜として利用される生育ステージは、生まれた直後から、死の直前まで、非常に多様で幅広い。その一方で、個々の野菜では、収穫適期の幅が非常に狭い。例えば、キュウリは、21 cm、100 g程度のまっすぐ伸びたものが標準とされるため、キュウリ農家ではその大きさに合わせて1日に2回収穫している。また、収穫適期は、その国の食文化の影響を受けるため、日本以外の国では、もっと長く太いキュウリが市場に並んでいることが多い。他の野菜品目でも、キュウリほど極端ではないが、収穫適期の幅は、大きさや熟度を考慮して、数日間であることが多い。日本では、多くの野菜で、病害虫抵抗性や収穫時期や大きさなど、生育の揃いを良くするため、商業栽培では専らF1種子が用いられている。その一方で、近年では、地方の多様な在来種にも関心が寄

せられている。

日本で栽培される果実（果樹）は、ウンシュウミカン、その他のカンキツ類、リンゴ、ナシ、カキ、ブドウ、モモ、ウメ、キウイフルーツ、セイヨウナシ、オウトウ、クリ、ビワ、パイナップル、スモモなどである。野菜に比べて、年一作が基本で、収穫時期に偏りがあるのが特徴である。また、それぞれに多くの品種があり、早生や晩生など栽培特性や、外観や食味など異なった特徴を持って

いる。品種特性を維持するため、種子ではなく、主に挿し木や接ぎ木で増殖させる。

キノコも、マツタケのように天然ものから、シイタケ、エノキタケなど原木栽培に始まり、菌床栽培が可能になったもの、さらにはナメコ、ヒラタケ、マイタケ、エリンギ、ブナシメジ、ハタケシメジ、ヤマブシタケなどのように菌床栽培法が開発されたものもある。それぞれ形状や、香り、テクスチャーに特徴がある。

このように、ひと言で青果物といっても、多くの品目、品種があり、栽培環境や収穫のタイミングによって品質が大きく異なるため、それぞれの特性については、各論にならざるをえないのが現状である。本稿では、青果物の生理特性と鮮度の関係については、野菜を中心に見ていきたい。

3. 青果物の鮮度とは

青果物の鮮度とは何か、研究上の問題点について、学術的に考えてみたい。

岐阜県が行っている農産物購入に関するアンケート調査⁴⁾では、農産物を購入する際に「鮮度」がいちばん重視され、「価格」や「安全性」がこれに次ぐ傾向は、平成10年以来、平成27年度まで変わっていない。このように「鮮度」は、消費者が野菜等青果物を購入する際に、最も重要な要素であるが、野菜の「鮮度」そのものの定義や評価法が定まっていないのが現状である。店頭では、主に外観によって主観的に評価されることが多い。このような主観的な外観評価では、個々の評価者によって「鮮度」が異なるのに加え、外観の「鮮度」が、内部の品質や生理を必ずしも反映していないケースもあり、問題となっている。

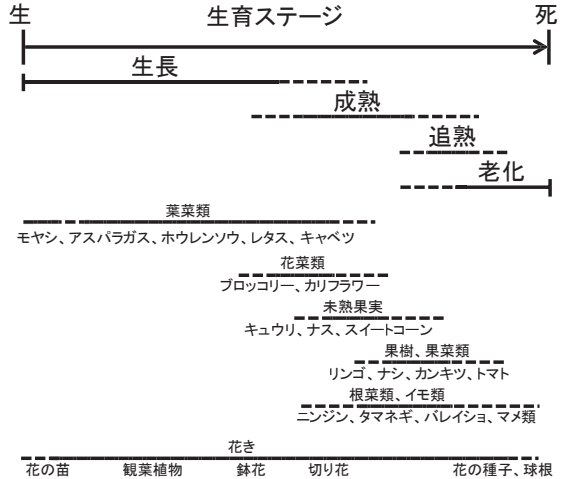


図2 生鮮農産物の収穫時期と生育ステージの関係

Watada(1984)³⁾をもとに作成。

まず、鮮度低下の出発点となる「収穫」について考えてみたい。「収穫」は、野菜の生理に大きな変化をもたらす人為的操作である。植物器官の一部である野菜は、収穫によって、それまでの栽培環境から収穫後の環境へ移行し、水、養分、光などの環境が激変する。収穫された野菜は、水、養分、光が供給されない環境で、収穫時の切断傷害や、その後の乾燥ストレス、暗黒ストレス等に応答しつつ、限られた栄養分の蓄積を使って呼吸をはじめとする様々な生命活動を続けるため、収穫前にはみられなかった鮮度低下あるいは品質劣化と呼ばれる特異的な生理変化が進行する（図3）。

野菜は利用される植物器官や生育ステージが多様で、それぞれの野菜に含まれる成分も大きく異なるため、それらを統一した「鮮度」の定義が難しく、すべての野菜に適用可能で、数値化が可能な鮮度評価の基準は無い。野菜の「鮮度」は、あくまでも仮想的な概念、仮想的な尺度であり、「品質」との関連をどのように捉えるか、個々の研究者でも見解が異なっているのが現状である。

収穫直後の野菜の品質が最も良く、時間とともに低下していく品質の一部が「鮮度」という考え方がある（図4）⁵⁾。総論としては多くの野菜にあてはまるが、トマトやメロンなど、収穫後の追熟により品質が向上したり、食用に適するように変化するものにはあてはまらない。

一方、青果物の品質が最高に達した時を鮮度のスタートと考え、それ以前は鮮度の概念の範囲外にあるとする定義もある（図5）⁶⁾。この場合には、収穫してから熟するまでの期間の鮮度評価をどう捉えるか、また、トマトやメロンなどでは、品質が最高に達した事をどのように判定するかが問題となろう。

ここでは、「野菜の鮮度」を、収穫時を最高（あるいは満点）として、時間とともに低下していく仮想的な尺度としたい（図6）。この場合、「鮮度」の評価と「品

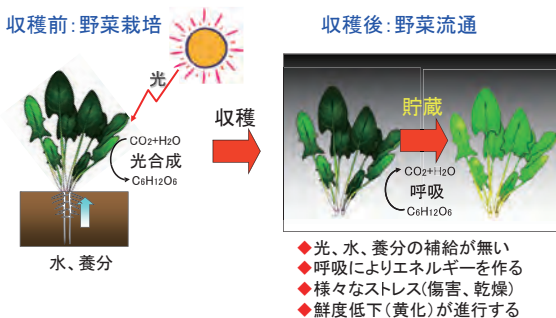


図3 収穫によって激変する野菜の環境

栽培時の、光、水、養分がある環境から、収穫という人為的な操作によって、光、水、養分のない環境へと変化する。さらに、収穫による切断傷害等のストレスによって、鮮度低下が促進される。永田原図。

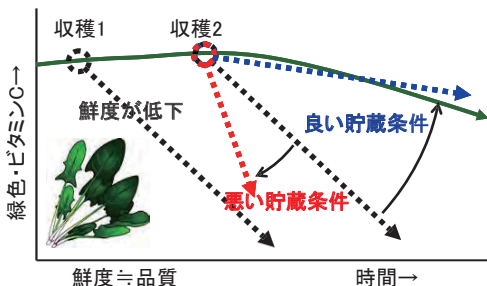


図4 野菜の「鮮度」：収穫時品質最高説

ホウレンソウの品質成分（点線；クロロフィルやビタミンC）は、収穫時に最高で、徐々に減少する。永田原因。

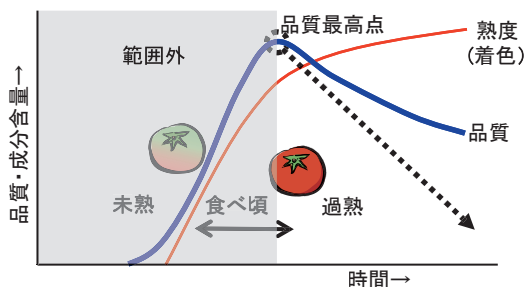


図5 野菜の「鮮度」：品質最高時鮮度低下開始説

トマトなど、収穫後に品質が向上するものは、品質が最高になった時から鮮度低下（点線）が始まると考え、それまでの時間は、鮮度の範囲外とする。永田原因。

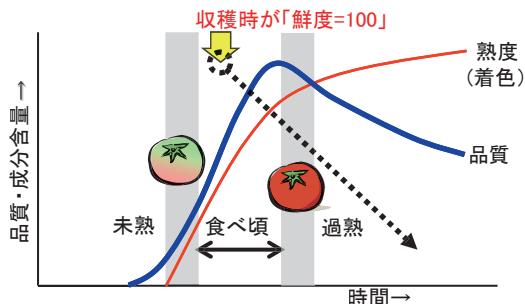


図6 野菜の「鮮度」：鮮度・品質分離説

鮮度を、収穫時を満点として時間とともに低下する仮想的な尺度（点線）とする。品質成分の変化とは独立。永田原因。

質」の評価は、ある程度独立したものと考えるべきであろう。例えば、同じように赤く熟したトマトでも、収穫したばかりのトマトと、1週間前に収穫したトマトを比較すれば、品質の評価は同じであっても、鮮度は前者のほうが良いと評価するのが妥当と考えている。

ただ、いずれの定義を採用するにしても、「鮮度」を正確に評価する場合には、収穫直後の状態と比較することが必要であるが、市場に流通する多くの青果物では、それは不可能に近い。

「鮮度」の低下については、指標として何を採用するのか、官能評価、あるいは着目する成分等によって鮮度の評価は大きく異なるものと考えられる。それぞれの青果物に対する評価項目や評価の方法については、評価者の間で基準の統一など、さらに論議を必要とするところである。

一方で、アメリカをはじめ、諸外国においては、農産物を購入する際に freshness が重要視されるという文献は見あたらない。これは、諸外国において、野菜等の青果物は、栽培可能な時期にのみ栽培して、それ以外は輸入するのに対し、日本では、新しい野菜品種や作型の開発により、従来は不可能であった時期に出荷するような技術開発が、園芸研究の大きな柱として継続して行われてきたことにも関係するものと思われる。また、日本では多くの青果物が包装された状態でスーパーマーケットの店頭に並ぶことが多いのに対し、諸外国では、山積みされた野菜や果物から、自己責任で購入する個体を選別するという購買方法にも関係しているかもしれない。これら、生産や消費スタイルの違いから、諸外国に比べて日本では、青果物のコストが高いとされるが、その根底には、日本では、

表1 野菜の品目と鮮度に関連する評価項目(野菜の品質評価法(IV)⁷⁾をもとに作成)

野菜の品目	鮮度に関連する評価項目
アスパラガス	重量減少率、萎凋、色調、光沢、腐敗、穂のしまり、曲がり、病害、切り口変質
イチゴ	重量減少率、着色熟度、光沢、萎凋、腐敗、損傷、がくの褐変、カビ
エダマメ	重量減少率、萎凋、葉色黄化、粒色、腐敗、障害、莢の褐変
キャベツ	重量減少率、萎凋、色調変化、腐敗、切り口褐変、調整歩留、葉の脱離、損傷、内部障害、花芽伸長
キュウリ	重量減少率、萎凋、果皮色、す入り、腐敗、肥大、空洞、硬さ、イボ落ち、光沢
スイートコーン	重量減少率、苞皮色、苞の萎凋、粒の萎凋、苞の腐敗
スイカ	果肉変色、果肉劣化
ダイコン	重量減少率、萎凋、葉色、腐敗、表皮変色、肉質変色、萌芽、す入り
トマト	重量減少率、着色熟度、腐敗、へた萎凋、光沢、軟化
ニンジン	重量減少率、萎凋、表皮変色、腐敗、萌芽、発根、歩留
ハクサイ	重量減少率、調整歩留、萎凋、葉色黄化、腐敗、切り口変色、損傷、抽台
ピーマン	重量減少率、萎凋、腐敗、着色、切り口変色、種子黒変、果肉黄化
ブロッコリー	重量減少率、萎凋、黄化変色、褐変、腐敗、切り口腐敗
ハウレンソウ	重量減少率、調整歩留、萎凋、葉色黄化、腐敗、損傷、つや
メロン	重量減少率、果肉質、水浸状化、追熟度、硬さ、果梗しおれ、果皮面黄化、ピツティング、カビ、腐敗、果肉色
レタス	重量減少率、調整歩留、萎凋、葉色黄化、腐敗、損傷、切り口変色、褐変、抽台

青果物の「品質」と「鮮度」を重要視する食文化が、長い時間をかけて形成されてきたことにあると考えている。その一端として、国内での野菜生産が不足した場合に、価格の安い外国産野菜の輸入が増えることがあるが、国内生産がある程度戻ると、輸入が減ることから、例外はあるものの、日本の野菜市場は、単に価格だけでは動いておらず、鮮度、品質、安全・安心などで国産が積極的に選ばれていることを示している。

このようなことを踏まえた上で、野菜ごとの鮮度評価に関連する項目の例⁷⁾を、表1にまとめた。野菜の収穫後に変化する主な項目と変化の傾向、および測定の方法等について以下に概説する。

4. 青果物の鮮度評価法

1) 官能評価

野菜の鮮度評価は、外観等の官能評価で行われることが多い。収穫後の取り扱い条件（流通貯蔵条件）が良ければ品質が保たれ、外観も良いというのは真であるが、逆は必ずしも真ではない。例えば、葉菜類等を冷水に浸けて吸水させる、いわゆる「蘇生」は、外観は良くなるが、中に含まれる品質成分の含量が改善するわけではないことに留意する必要がある。

官能評価の項目としては、色、つや、しおれ、香り、触感（硬度）、食味、食感（テクスチャー）などがあり、非破壊で評価可能な項目と、破壊を伴う評価項目がある。また、官能評価の特徴として、評価者によって評価結果が異なる場合があるので、評価のポイントや評点について予め実物を使って統一を図るのが望ましい。

2) 機器分析

この30年ほどで、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）をはじめとする機器分析の技術が急速に一般化し、微量成分まで精度良く分析できるようになってきた（表2）。分析手順の詳細については、「新・食品分析法」⁸⁾等の書籍を参考にされたい。

(1) **クロロフィル**：葉緑体に含まれるクロロフィルは、植物として光合成を行うために必須の物質であり、野菜の外観色としても重要な品質成分である。クロロフィルは、有機溶媒によって抽出し、650 nm 付近の吸光度を使って計算で求めることができる。通常の植物では、クロロフィル a と b が主な色素で、その比は約3対1である。HPLCによってカロテノイドと同時に定量することも可能である。また、葉色計や色彩色差計によって非破壊的にも評価される。クロロフィルの分解は、植物組織の老化（鮮度低下）の典型例であり、葉菜類の古い外葉ではクロロフィルが分解されやすい⁹⁾。

(2) **ビタミンC**：アスコルビン酸（AsA）とデヒドロアスコルビン酸（DHA）を合計したもので、青果物にはAsAが多く含まれている。葉菜類では、収穫後に

表2 野菜の鮮度に関連する項目とその評価・分析法（永田作成）

分析項目	主な分析方法、分析装置	サンプリング	
		破壊的	非破壊的
色	官能評価(目視)、色彩色差計、画像解析		○
つや	官能評価(目視)、光沢計、画像解析		○
香り	官能評価(嗅覚)、GC、GC-MS、匂いかぎGC、においセンサー	○	○
味	官能評価(味覚)、Brix糖度計、pHメータ	○	
物性	官能評価(食感、触感)、突き刺し応力計、打音、固有振動	○	○
クロロフィル	HPLC、葉色計、分光光度計	○	○
ビタミンC	HPLC、RQ flex、比色定量(分光光度計)	○	
カロテノイド	HPLC、LC-MS、分光光度計	○	
アントシアニン	HPLC、LC-MS、分光光度計	○	
糖	HPLC、Brix糖度計、近赤外分光計、HPCE	○	○
有機酸	HPLC、pHメータ、滴定酸度計、近赤外分光計、HPCE	○	○
遊離アミノ酸	HPLC、LC-MS、アミノ酸分析装置、HPCE	○	
食物繊維	比色定量(分光光度計)	○	
水分	重量変化測定(水分減少率)、乾燥重量測定(水分含量)	○	○
呼吸量	GC、酸素センサー、炭酸ガスセンサー		○
エチレン生成量	GC、Photo-Acoustic Spectroscopy		○
メタボローム解析	GC-MS、LC-MS	○	
タンパク質	比色定量、酵素活性測定(分光光度計)	○	
遺伝子発現	ノーザン解析、定量PCR	○	
トランスクリプトーム解析	DNAマイクロアレイ、mRNAseq	○	

注) HPCE: キャピラリー電気泳動装置

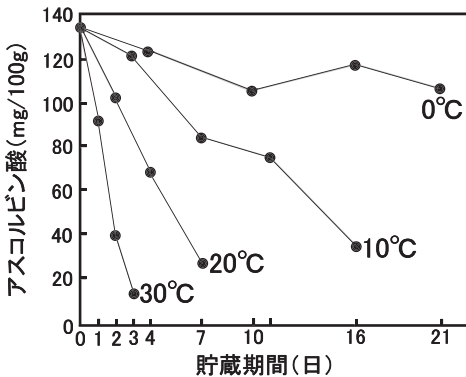


図7 貯蔵温度とホウレンソウ外葉のアスコルビン酸含量の変化(日坂ら, 1991)

AsA 含量が時間とともに低下することが良く知られており、鮮度評価の良い指標である(図7)¹⁰⁾。ただし、トマトなど、野菜の種類によってはビタミンC含量があまり変化しないものもあり、すべての野菜に適用できるわけではない。また、冬に収穫したホウレンソウのビタミンCは60 mg/100 gであるのに対し、夏に収穫したホウレンソウでは、20 mg/100gと大きく減る¹¹⁾。市場に流通している青果物では、収穫直後のビタミンC含量は測定されていないので、任意の測定値から、収穫後に

起きた変化を知ることはできない。ビタミンCの定量法は、古くから比色定量が行われてきたが、最近ではHPLCによる分析が一般的である。また、簡易測定装置（Merck社RQflex）を用いたAsAの分析も現場で使われるようになってきた。

(3) **糖類**：野菜の品質には、ブドウ糖、果糖、ショ糖の関与が大きい。他にも多糖類のペクチン、デンプン、イヌリンなどが含まれている。収穫された野菜は、体内に蓄積された糖や有機酸を主なエネルギー源として生命活動を行うため、収穫後に糖が消費される。簡便には屈折計示度（Brix糖度）が広く使われているが、糖以外の成分の影響も考慮する必要がある。糖の分析法として還元糖の比色定量が行われたが、最近ではHPLCによって分析されることが多い。一部の果菜類や果実では、近赤外分光法に基づく非破壊計測が行われている¹²⁾。また、エダマメでは、収穫後にラフィノースやスタキオースが特異的に蓄積することが知られている¹³⁾。

(4) **有機酸**：野菜の品質は、甘味（糖）と酸味（有機酸）の比（糖酸比）が重要である。野菜や果実には主にクエン酸、リンゴ酸等が含まれている。簡便には、pHや滴定酸度が用いられるが、個別の有機酸含量はHPLCで分析される。

(5) **アミノ酸**：一部のアミノ酸は、旨味に関与している。野菜の種類によって、特定のアミノ酸含量が熟度の変化や貯蔵に伴って変動することが知られている¹⁴⁾。野菜のアミノ酸は、アミノ酸分析計あるいはHPLCを用いて、遊離型のアミノ酸を分析する必要がある。キャベツのメチルメチオニンスルホニウム塩（ビタミンU）¹⁵⁾のように、野菜の種類によっては特有のアミノ酸誘導体が含まれ、貯蔵に伴って変動する。

(6) **食物繊維**：水溶性の食物繊維と不溶性の食物繊維があり、抽出操作によって分別される。トマト果実の成熟に伴って細胞壁成分であるペクチン（水溶性食物繊維）が分解され、低分子化する¹⁶⁾。また、アスパラガスでは、流通中に不溶性の食物繊維（リグニン）の合成が起こることが知られている¹⁷⁾。

(7) **水分**：収穫後も蒸散によって水分が失われる。水分の減少は、ナスやキュウリなど表面の光沢や、葉や「がく」の萎凋となって現れる。収穫時の水分から約5%が失われると、多くの野菜で商品性を失うとされる⁵⁾。水分の減少率は、質量に対して表面積の大きな葉菜類のほうが果菜類や根菜類よりも大きい。

(8) **呼吸**：野菜は、収穫後も呼吸によって生命活動に必要なエネルギーを作っている⁵⁾。呼吸は、糖や有機酸を消費するため、品質低下の主な要因と言える。呼吸は温度の影響を大きく受ける。野菜の品温を10℃下げることにより、呼吸速度は約半分になることが知られている¹⁸⁾。また、トマト果実の成熟など生理変化によっても呼吸速度が2倍程度増えることが知られている¹⁹⁾。呼吸はガスクロマトグラフィー（GC）で精密に測定することが可能である。

(9) **エチレン生成**：植物ホルモンであるエチレンは、野菜を収穫したことによる切断傷害ストレス²⁰⁾や乾燥ストレス、あるいは果実の成熟¹⁹⁾などの変化に伴っ

て生成が増大する。エチレンには、呼吸や二次代謝、エチレン生成を促進して野菜の品質変化（劣化）を促進する作用がある²¹⁾。エチレンは、ガスクロマトグラフィーを用いて ppm 以下のオーダーで精度良く測定することができる。

(10) **その他の成分**：ポリフェノール²²⁾，膜脂質²²⁾，植物ホルモン²²⁾，トマト果実のリコペン²³⁾，イチゴのアントシアニン²⁴⁾ 等も収穫後に変化することが知られている。

(11) **脂質**：貯蔵に伴う積算温度に比例して脂質過酸化物の割合が増加することを利用して、ホウレンソウ，コマツナ，パセリ，キュウリ，ニンジン，ブロッコリーの鮮度を評価する方法が考案されている²⁵⁾。

3) 遺伝子マーカーの利用

植物には切断傷害などのストレスによって、特異的に誘導される遺伝子群がある。植物の傷害反応には、エチレン，ジャスモン酸，アブシジン酸などの植物ホルモン，システミンと呼ばれるペプチドや，オリゴ糖も関係して，傷害が与えられた部位だけでなく，植物全体が（全身的な）反応を引き起こすことがわかってきた²⁶⁾。これら傷害反応における遺伝子発現制御の機構が明らかになれば，鮮度評価の指標として利用できる可能性がある²⁷⁾。一例として，著者らによるホウレンソウの鮮度評価法について概説する。ホウレンソウを 10℃ で 4 日貯蔵する前と後で，発現量の異なる遺伝子をサブトラクション法で濃縮し，それらを鮮度マーカー遺伝子の候補として塩基配列を明らかにした。これらの中には，タンパク質分解酵素，糖加水分解酵素，感染特異タンパク質などをコードしているものが得られた。これらの遺伝子の経時的発現変化を調べると，黄化が観察されな

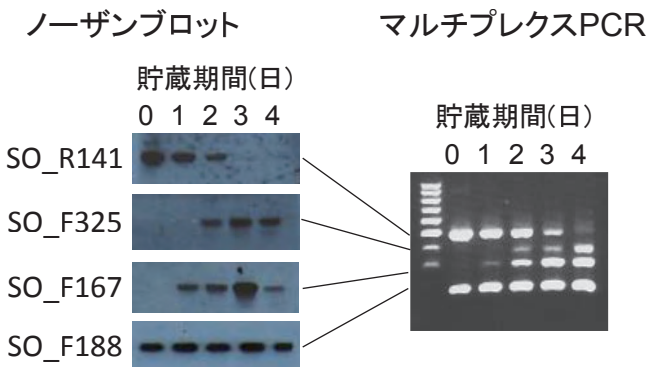


図8 鮮度マーカー遺伝子による鮮度評価

数字はホウレンソウの 10℃ 貯蔵日数。4 日目に黄化。永田原図。

左：ホウレンソウの鮮度低下に伴う遺伝子の発現変化

右：マルチプレクス PCR による検出

い貯蔵1日後、あるいは2日後の段階で発現が上昇しているものがあつた。これらを「鮮度マーカー」として利用することにより、外観に変化が現れるまでに、遺伝子発現レベルで鮮度低下の兆候を検出することが可能と考えられた。さらにこれらの遺伝子を、複数組み合わせるマルチプレクスPCRによって簡便に鮮度低下を検出可能な方法を開発した(図8)²⁸⁾。今後、これらの鮮度に関する遺伝子マーカーは、青果物の鮮度評価に用いるだけでなく、最適貯蔵条件を設定する際や、異なる貯蔵装置・貯蔵条件の比較にも使用されるものと考えられる。さらに、遺伝子発現に着目して、日持ち性に優れた品種の育成にも応用できるものと考えている。

5. 収穫後の品質変化の生理学

1) 呼吸

野菜、果実等の青果物は、収穫後も生命活動を維持するために、自らの体内にある糖や有機酸を有酸素的に分解して、生命活動に必要なエネルギーを作る。これらの典型的な反応は、糖と酸素から、二酸化炭素と水、エネルギー(ATP)を作る、いわゆる呼吸反応である(式1)。野菜の生命活動に必要なエネルギーの供給は、呼吸に依存しているため、呼吸速度が青果物の生理活性の重要な指標となっている。



また、呼吸等の酵素反応は化学反応の一種で、反応速度は温度の影響を大きく受ける。従って、貯蔵中の温度は、青果物の品質保持における最も重要な因子といえる。青果物の温度と呼吸速度の関係の概念を図9に示す¹⁸⁾。この中で、温度が10℃変化した場合の呼吸速度の比を Q_{10} (キューテン)と呼ぶ。図9では、30℃における相対的呼吸速度(棒グラフ)は、20℃の2倍、即ち Q_{10} は2となる。このことは、30℃に比べて、20℃で貯蔵した場合には、呼吸速度は半分となり、品質劣化の速度が半分になるため、相対的日持ち性は2倍になることを示している(折れ線グラフ)。他の温度間でも同様に相対的呼吸速度を比較したり、0℃の相対的日持ち性を100として各温度における日

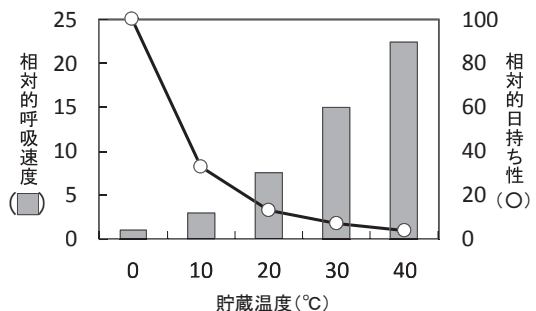


図9 青果物の貯蔵温度と相対的呼吸速度および相対的日持ち性の関係を示す概念図

Kaderら(2002)を改変。

持ち性を推測することができる。ただし、各 10℃間の呼吸速度の違いは、いつも 2 倍というわけではなく²⁹⁾、呼吸だけが品質低下の要因でもないで、それぞれ青果物の品目については、実際に貯蔵試験を行って、品質変化の少ない条件を調べる必要がある。

呼吸の基本は、ブドウ糖と酸素を基質に、水と二酸化炭素が生じる反応であるため、貯蔵する雰囲気中の酸素濃度を下げると反応基質の不足により呼吸が抑制される。一方で、二酸化炭素濃度を上げた場合には反応生成物のフィードバック阻害によって呼吸が抑制されると考えられる。

さらに、青果物のまわりの酸素濃度が極端に低い場合には、無気呼吸によって、ピルビン酸からアセトアルデヒドを経てエタノールが生成し、強い異臭や異味の原因となる³⁰⁾。また、低酸素下に置かれたブロッコリーは、エタノールやアセトアルデヒドだけでなく、メタンチオールやジメチルジスルフィド等の硫黄化合物も異臭成分として生成するが、外観には異常が無く、加熱調理する段階で強い異臭が発生することがあるので、注意が必要である³¹⁾。

このように、適度な低酸素、高二酸化炭素は、呼吸の抑制に効果がある一方で、極端な低酸素あるいは高二酸化炭素は、低酸素障害や、高二酸化炭素（高炭酸ガス）障害につながる可能性があるため、包装資材のガス透過性など、青果物の置かれたガス環境にも注意が必要である³²⁾。

2) 蒸散

青果物の多くは 85～95% 程度の水を含んでいる。野菜の中でもとくに表面積の大きな葉菜類は、果菜類や根菜類に比べて水分の蒸散が激しく、萎れやすい。野菜の場合、水分のおよそ 5% が失われると光沢や張りがなくなって、商品性を失うとされている⁵⁾。そのため、貯蔵環境の湿度が高いほど蒸散が抑制され、青果物の品質保持期間が長くなる。また、カキなど一部の青果物は、水分が失われやすい環境で、低湿度によってエチレン生成速度が増大し、軟化などの品質変化が促進されることが知られている³³⁾。青果物の品質保持では、温度に次いで湿度が重要な因子である。簡易な包装等によって高湿度に保つことは、日持ち性の延長に有効である。

3) エチレン生成

エチレンは、 C_2H_4 の化学式を持つガス状の植物ホルモンで³⁴⁾、³⁵⁾、³⁶⁾、植物の老化や果実の成熟において重要な役割を示すため、老化ホルモンあるいは成熟ホルモンと呼ばれている。エチレンは、1 ppm 以下の低濃度でも様々な青果物に生理作用を示すことが知られている³⁷⁾。

エチレン生合成経路は、発見者の名前から、Yang 回路と呼ばれる³⁵⁾。エチレンは、アミノ酸の一種であるメチオニンから作られる（図 10）。生成したエチレ

5) その他

上記以外にも、青果物の収穫後には、品目によって、クロロフィルの分解や⁹⁾、ポリフェノール²²⁾、カロテノイド²³⁾、アントシアニン²⁴⁾の蓄積などの変化が起こる。

また、収穫時や流通中の傷によって褐変が生じたり、振動によって呼吸が増大する⁴²⁾ことがある。

さらに、貯蔵温度によっては、凍害、低温障害、高温障害が起きて、品質が著しく低下する場合がある。

青果物の表面あるいは内部には通常、非病原性の細菌、酵母、カビなどが付着している。収穫してからしばらくは、これらの微生物の繁殖は抑えられているが、貯蔵によって青果物の細胞の活性が低下すると、低温であっても灰色カビなどが繁殖して、品質が著しく低下する場合がある⁴³⁾。

5. 品質保持技術

1) 温度制御

野菜の呼吸速度は、一般に葉茎菜類で大きく、果菜類、根菜類の順に小さくなる。野菜の呼吸速度は、温度が10℃低くなると、およそ半分程度になることが知られている。このことが、野菜を低い温度で貯蔵すると、品質が保たれる基本的な原理となっている¹⁸⁾。

また、野菜の温度を下げることにより、蒸散の速度も遅くなり、水分の損失を抑制できる。このように温度は、野菜の品質保持の最も重要な要因であるが、凍結した場合には野菜の組織が傷ついてしまうため、野菜の貯蔵温度は、凍結しない範囲で、なるべく低い温度が望ましい。一般的には、冷蔵装置の性能を考慮して貯蔵温度は5℃ぐらいに設定されることが多い。しかし、カボチャ、キュウリ、サツマイモ、ショウガ、スイカ、トマト、ナス、パレイシヨ、ピーマン、メロン等野菜の品目によっては、一定の温度以下で貯蔵されると、生理的な障害（低温障害）を起こすものがある⁴⁴⁾。それらの多くは、熱帯や亜熱帯など暖かい地域に



図 11 ナスの低温障害（永田原図）

起源を持つ野菜である。ナスなどは低温で貯蔵すると、種子のまわりが茶色になり（褐変）、表皮に茶色のへこみ（ピットティング）ができる場合があるので（図 11）、貯蔵温度には注意が必要である。主な野菜の最適貯蔵条件を表 3 に示す⁴⁵⁾。また、短時間の高温ストレス処理によって、代謝を抑制し、トマトの追熟⁴⁶⁾やブロッコリーの黄化⁴⁷⁾を遅らせることが知られている。

冷凍に関しては、ブロッコリー、ス

表3 主な野菜の最適貯蔵条件（永田とりまとめ）

品目名(五十音順)	貯蔵最適 温度(°C)	貯蔵最適 湿度(%)	貯蔵限界 (目安)	エチレン 生成量	エチレン 感受性	低温貯蔵とフィル ム包装の組合せ
アスパラガス	2.5	95~100	2~3週	極少	中	有効
イチゴ	0	90~95	7~10日	少	低	有効
エダマメ	1	データ無し	20日	データ無し	データ無し	有効
オオバ(青シソ)	8	100	2週	データ無し	中	有効
オクラ	7~10	90~95	7~10日	少	中	有効
カブ	0	98~100	4月	極少	低	有効
カボチャ	12~15	50~70	2~3月	少	中	不要
カリフラワー	0	95~98	3~4週	極少	高	データ無し
キャベツ(早生)	0	98~100	3~6週	極少	高	有効
キャベツ(秋冬)	0	98~100	3~4月	極少	高	有効
キュウリ	10~12	85~90	10~14日	少	高	有効
ゴボウ	0~2	データ無し	3~4月	データ無し	データ無し	有効
サツマイモ	13~15	85~95	4~7月	極少	低	有効
サトイモ	7~10	95~90	4月	データ無し	データ無し	穴あき袋
サヤインゲン	4~7	95	7~10日	少	中	有効
サヤエンドウ	0	90~98	1~2週	極少	中	データ無し
シュンギク	0	95~100	14日	少	高	有効
ショウガ	13	65	6月	極少	低	有効
スイカ	10~15	90	2~3週	極少	高	不要
スイートコーン	0	95~98	5~8日	極少	低	有効
セルリー	0	98~100	1~2月	極少	中	有効
ソラメ	0	90~95	1~2週	データ無し	データ無し	データ無し
ダイコン	0~1	95~100	2~3月	極少	低	データ無し
タケノコ	0	データ無し	30日	データ無し	データ無し	データ無し
タマネギ	0	85~70	1~8月	極少	低	不要
トマト(完熟)	8~10	85~90	1~3週	多	低	データ無し
トマト(緑熟)	10~13	90~95	2~5週	極少	高	データ無し
ナス	10~12	90~95	1~2週	少	中	有効
ニラ	0	95~100	1週	少	中	有効
ニンジン	0	98~100	3~6月	極少	高	有効
ニンニク	-1~0	65~70	6~7月	極少	低	不要
ネギ	0~2	95~100	10日	少	高	有効
ハクサイ	0	95~100	2~3月	極少	中~高	有効
パレिशヨ(未熟)	10~15	90~95	10~14日	極少	中	穴あき袋
パレिशヨ(完熟)	4~8	95~98	5~10月	極少	中	穴あき袋
パセリ	0	95~100	1~2月	極少	高	有効
ピーマン	7~10	95~98	2~3週	少	低	有効
ブロッコリー	0	95~100	10~14日	極少	高	有効
ホウレンソウ	0	95~100	10~14日	極少	高	有効
メロン(ネットメロン)	2~5	95	2~3週	多	中	データ無し
メロン(その他)	7~10	85~95	3~4週	中	高	データ無し
ヤマイモ(ナガイモ)	2~5	70~80	2~7月	極少	低	有効
ヤマイモ(ダイジョ)	15~16	データ無し	6月	データ無し	データ無し	データ無し
レタス	0	98~100	2~3週	極少	高	有効
レンコン	0	98~100	1.5月	データ無し	データ無し	有効

参考 (<http://postharvest.ucdavis.edu/>) 等

注) 実験データ等を参考としているため、随時追加、修正されます。

イートコーン、ニンジン、グリーンピースなど、加熱調理を前提としたものについてはすでに実用化されているが、イチゴなど、生で食べることを前提としたものでは、冷凍時の氷結晶の生成によって細胞膜が損傷するため、現状の冷凍・解凍技術では、冷凍前の物性に戻すことはできず、さらなる技術開発が求められている⁴⁸⁾。

日本では、1965年に、科学技術庁が提出した「食生活の体系的改善に資する食料流通体系の近代化に関する勧告」（通称コールドチェーン勧告）により、生鮮食料品の出荷から消費まで、低温が鎖のように途切れることなくつながることを目指した流通体系の整備が始まった⁴⁹⁾。貯蔵温度、貯蔵期間と品質の関係については、Time-Temperature Tolerance (TTT, 許容温度時間) の概念が応用されて、貯蔵温度ごとに品質保持期間が示されたが⁵⁰⁾、品目によって温度に対する生理特性が異なるため、温度と化学反応速度の関係を示すアレニウス式に基づいたモデル化には至っていないのが現状である。

2) 湿度制御

温度の次に重要な因子が湿度である。一般的に湿度が高いほうが水分損失が少ないために野菜の保存には有利であるが、ショウガやタマネギ、ニンニク、ヤマイモなどは、65%程度の湿度が貯蔵に適している⁴⁵⁾。低温によって、呼吸が抑制されるだけでなく、水分の蒸散も抑制されるが、低温貯蔵庫や冷蔵庫など庫内の湿度が制御できない場合には乾燥が進むことが多いので、野菜をプラスチックフィルムや、ぬれ新聞等で包装して、水分の損失を防ぐ必要がある。

その一方で、湿度が高いとカビ等が生育しやすく、さらに結露水がある場合には、細菌等も繁殖しやすいので、注意が必要である⁴³⁾。

3) ガス環境（酸素、二酸化炭素、エチレン）制御

野菜等の青果物を低酸素、高二酸化炭素の条件に置くと、呼吸が抑制される現象は、Controlled Atmosphere (CA) 効果と呼ばれている⁵¹⁾。日本においては、青森県などで、秋に収穫したリンゴを、温度、湿度、酸素濃度、二酸化炭素濃度、エチレンガス濃度の制御が可能な巨大な気密型の貯蔵庫 (CA 貯蔵庫) に貯蔵し、品質変化を最小限にして、年間を通じて順次出荷されている。リンゴの貯蔵最適条件は、温度：-1～0℃、湿度：90～95%、酸素：2～3%、二酸化炭素：1～2%とされている⁵¹⁾。また、包装することによって、包装内を適度な低酸素、高二酸化炭素にして貯蔵する方法を Modified Atmosphere (MA) 貯蔵と言う⁵²⁾。野菜の包装に用いる資材にはポリエチレンやポリプロピレンを始め、多くの種類があるが、野菜等青果物の MA 包装 (MAP) に適しているのは、ガス透過性が比較的大きいフィルム資材である。包装の設計にあたっては、中に入れる野菜の種類、大きさ、呼吸速度、エチレン生成速度、エチレン感受性、流通中の気温等多くの条件を考慮して、包装に用いるフィルムの材質、厚さ、面積、

構造（微細孔やパーシャルシール包装⁵³⁾などを十分に検討し、適切な条件を求めるとともに、ある程度の余裕をもたせることが重要である。

包装を用いる場合には、まず、温度管理が適切に行われていることが大前提である。包装で密閉したまま想定以上に温度が高くなると、中に入れた野菜の呼吸によって酸素が消費し尽くされ、嫌気呼吸によりエタノールやアセトアルデヒド等の異臭物質が生成するので注意が必要である³⁰⁾。

その一方で、高酸素濃度（40～100%）、高二酸化炭素（20～60%）の組み合わせが、ブロッコリーの黄化などの品質変化を抑制するというデータも示されており⁵⁴⁾、今後の研究の進展が期待される。

酸素、二酸化炭素以外にも、エチレンが野菜の鮮度低下に大きく影響する²¹⁾。貯蔵環境中のエチレン濃度を下げするために、各種のエチレン除去資材が提案されているが、一旦吸着されたエチレンが、高湿度条件下で放出されるものもあり、資材の選択には注意が必要である⁵⁵⁾。

また、エチレン受容体に結合することによって、エチレンの作用をブロックする物質が発見された（図12）。この物質は1-methylcyclopropene (1-MCP) と呼ばれ⁵⁶⁾、すでにアメリカ、EU、オーストラリア、中国など30カ国以上で使用が認可されている。日本では、リンゴ、ナシ、カキを対象に2010年11月9日に農薬登録が認められている。1-MCPは、エチレン受容体に強く結合することによって、非常に低濃度でエチレンの作用阻害活性を示す。その一方で、エチレン受容体の代謝回転が早い品目の場合には、阻害作用の持続時間が短くなると考えられる。今後、野菜など他品目への適用拡大のためには、それぞれ品目ごとの作用持続性等の解明が必要である。

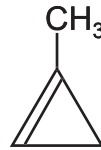


図 12 1-Methylcyclopropene (1-MCP) の構造

4) 光（電磁波）制御

葉菜類では、貯蔵中の暗黒によってクロロフィルの分解が促進されるが、低温貯蔵中に光を与えると、クロロフィルの分解が抑制されることが知られている⁵⁷⁾。

一方、着色の始まったピーマン果実に、蛍光灯の光を照射することによって、着色を促進することができる⁵⁸⁾。この時、ピーマン果実のカロテノイド合成経路の律速酵素であるフィトエン合成酵素の遺伝子発現が顕著に誘導されるとともに、クロロフィルの分解が促進されることが知られている⁵⁹⁾。

また、近赤外光を照射することによって、レタスなどの気孔が閉鎖し、水分蒸散の抑制につながると報告されている⁶⁰⁾。今後の実用化に向けては、効果が現れる品目、処理条件や、機構の解明など、さらに検討が必要と考えられる。

5) 圧力制御

青果物の減圧貯蔵は、1960年台から果実の貯蔵を対象として研究が行われてきた⁶¹⁾。減圧によって、酸素分圧が低下するとともに、二酸化炭素やエチレンの濃度が低下するために貯蔵可能日数が延長するものと考えられているが、装置コストの問題などから、青果物では実用化には至っていない。

一方、ウメ果実を、0.5 MPa (約 5 atm) 程度の加圧下で貯蔵すると、呼吸、エチレン生成、水分蒸散が抑制され、低温障害も抑制された⁶²⁾。今後、作用機構の解明が待たれる。

6. 今後に向けて

青果物は、品種や栽培条件によって、品質が一定しないことや、収穫後に品質が急速に劣化するという特性のために、食品流通上の様々な問題が未解決のまま残っているのが現状である。その解決をめざすひとつの切り口として、「鮮度」という観点から品質変化の機構を明らかにするとともに、その収穫後生理 (postharvest physiology) に基づいた品質制御技術を開発することが望まれる。近年、生物としての代謝系全体の変化を物質レベルで網羅的に調べるメタボローム解析や、遺伝子発現を網羅的に調べるトランスクリプトーム解析の技術が、青果物にも応用できる環境が整ってきた。今は、従来の特成分に着目した個別分析から、個体の代謝系全体の変化を網羅的解析によって理解し、その制御技術を開発する段階への過渡期と考えている。今後、新しい取り組みによって、以下に示すような現状の問題が、少しでも解決されることに期待している。

1) 加工業務用需要への対応

1990年頃から、野菜の用途別需要は、消費者が直接購入する家計消費費用が減り、加工業務用の需要が50%を越えて増加している⁶³⁾。加工業務用の野菜原料に求められる特性として、4つの「定」、すなわち、定時、定量、定価格、定品質がある⁶⁴⁾。これらは、工業原料として考えれば、当然の要求と言えるが、品種や栽培条件によって品質が大きく変動する青果物の特性を考えると、全く真逆の要求であり、対応することは容易ではない。今後は、加工業務用の原料となる野菜の生産を強化するとともに、いかに低コストで品質の変化を少なくしつつ一時的に貯蔵して、安定的に供給するかが重要になるものと考えられる。

2) 流通経費への対応

厚生労働省の健康日本21(第二次)では、国民の健康の増進の総合的な推進を図るための基本的な方針のひとつとして、食生活の改善に関して、野菜摂取量の平均値282g(平成22年)を350g(平成34年)にまで増加させる具体的な目標が示されている⁶⁵⁾。そのためには、品質の良い青果物を低コストで消費者

に届けることが重要である。食品流通段階別価格形成調査報告（青果物経費調査及び水産物経費調査）結果の概要⁶⁶⁾によると、青果物（調査対象16品目、100kgあたり試算値）の小売価格23,636円に対して、生産者受取価格は10,656円（45.0%）、流通経費は12,980円（54.9%）である。今後、青果物の消費を適正なレベルまで増やし、国民の健康の維持・増進を図るためには、青果物の低コスト生産技術だけでなく、青果物そのものの日持ち性を高めたり、低コストで鮮度保持効果の高い流通技術等、革新的な技術開発が必要と考えられる。

3) 自給率への対応

食料需給表によると、2016年度における食料全般のカロリーベースの自給率は38%で⁶⁷⁾、品目別の自給率を計算すると、野菜は80%、果実は40%である⁶⁸⁾。また、同じく食料需給表から計算される、生産から家庭の台所に届くまでの損失を示す減耗率は、野菜が10%、果実が17%である⁶⁸⁾。今後、我が国において、生産者と消費者の高齢化が進む中では、国内で生産された野菜や果実を、無駄なく消費者に届ける流通の仕組みを、より効率的なものに変え、流通中の損失をさらに減らし、最終的には減耗率を0に近づけるための技術開発を進めていく必要がある。また、従来は、廃棄されていたカラーピーマンの収穫残果に光照射することによって、出荷可能にする技術⁵⁹⁾や、規格外等の理由によって、出荷されなかった収穫物を生産者自らがジュース、ジャム、ドレッシング、ジェラートなどに加工し、高付加価値化して販売する、6次産業化⁶⁹⁾によって、生産物の出荷以外にも加工品の販売チャンネルを持つことによって十分な収入を確保しつつ、国内産野菜、果実の供給量（自給率）を底上げする方策なども、今後、流通研究のひとつの出口として期待される。

4) 輸出への対応

青果物の鮮度に関心が高いことは、他国と比べた場合に、日本の食文化の特徴のひとつである⁴⁾。また、日本の国土が南北に長く、産地リレーによる青果物の安定供給が大きな役割をもつことから、国内流通においても長距離輸送が重要である。また、輸出のための技術開発は、日本の国内流通技術を基礎として発展させることが望ましい。その場合にも、高品質・高鮮度をキーワードに、国内流通の技術のノウハウを数多く集積し、適切に組み合わせることによって、日本産の高品質な青果物を安定した品質で輸出するための独自の技術構築が可能になると考えている。

5) ポストハーベストからプレハーベストへのフィードバック

青果物のポストハーベスト研究における、収穫後生理の遺伝子レベルでの解明は、最適な流通条件の解明や²⁸⁾、輸送中の衝撃ストレスの解析⁷⁰⁾に使えるだけ

でなく、収穫前（プレハーベスト）に遡って、最適栽培条件の設定や、最適な収穫タイミングの提案、さらには、これまでの品種育成では認知されてこなかった、収穫後の生理障害の仕組みがポストハーベスト研究によって明らかにされ、従来にはない品質と栽培特性を持った新しい品種の効率的な育成につながる研究成果もダイコンなどが出つつある^{71),72)}。今後さらなる研究展開が期待される。

食品流通に関わる研究分野では、各青果物の品目の収穫後生理を含めた特性の解明と、それに応じた最適な流通環境の実現によって、高品質の維持とともに、食品のロス、いわゆる減耗率を下げ、低コスト化する研究を推進する必要がある。その核になると考えられる、保存環境条件と青果物の品質変化を定量化（Time Environment Tolerance; TET）する重要な概念が椎名によって提唱されている⁷³⁾。今後、流通中の青果物の物質レベル（メタボロミクス）および、遺伝子発現レベル（トランスクリプトミクス）の研究が、TETをキーワードとして統合されていくことを期待したい。

謝辞

原稿をとりまとめるにあたり、千葉大学椎名武夫教授から多くの有用なアドバイスをいただいたことに深謝いたします。

（食品加工流通研究領域 食品流通システムユニット 永田 雅靖）

参考文献

- 1) 農林水産省大臣官房統計部, 平成 28 年農業総産出額及び生産農業所得（全国）, 2017 年 12 月 26 日公表。
www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nougyou_sansyutu/attach/pdf/index-3.pdf
- 2) 吉川宏昭（2001）: 野菜の種類と分類. 西貞夫監修, 新編野菜園芸ハンドブック（養賢堂, 東京）pp.55-70.
- 3) Watada, A. E. *et al.* (1984) : Terminology for the description of developmental stages of horticultural crops. *HortSci.*, **19** (1), 20-21.
- 4) 岐阜県（2015）: 農産物購入・食生活に関するアンケート調査結果.
http://www.pref.gifu.lg.jp/kensei/koho-kocho/iken-teian/11103/monitor-anketo.data/2015_05-1_nousanbutu.pdf
- 5) 西條了康（1990）: 野菜・果実の生理作用と鮮度保持. 安井秀夫編著, 青果物流通入門（技法堂出版, 東京）pp.95-122.
- 6) 椎名武夫（2002）: 食品の鮮度とは何か－生鮮品－. 食品鮮度・食べ頃事典（サイエンスフォーラム, 東京）pp.23-37.
- 7) 食品総合研究所（1985）: 野菜の品質評価法（IV）.
- 8) 日本食品科学工学会 新・食品分析法編集委員会編（1996）: 新・食品分析法

- (光琳, 東京) .
- 9) 日坂弘行 (2011) : 収穫時のハウレンソウの大きさと品質および品質保持期間の関係. 千葉農林総研報, **3**, 31-36.
 - 10) 日坂弘行, 小倉長雄 (1991) : 貯蔵中のハウレンソウ部位別のアスコルビン酸含量の変化. 日食工誌, **38**(1), 41-43.
 - 11) 文部科学省資源調査分科会編 (2015) : 日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂). http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365297.htm
 - 12) 河野澄夫 (2005) : 近赤外分光法による果実糖度の測定. 食糧 - その科学と技術, **43**, 69-86.
 - 13) 中野浩平ら (2016) : 緑豆類野菜の鮮度判定法及び鮮度測定装置. 特許第 6031714 号 (2016.11.4) .
 - 14) 永田雅靖ら (1992) : トマト果実の成熟に伴う遊離アミノ酸含有量の変化, とくにグルタミン含有量の変動について. 日食工誌, **39** (1), 64-67.
 - 15) 瀧川重信, 石井現相 (1997) : 貯蔵キャベツにおけるビタミン U 蓄積の品種間差異. 園学雑, **66** (別 2), 720-721.
 - 16) Inari, T. *et al.* (2002) : Changes in Pectic Polysaccharides during the Ripening of Cherry Tomato Fruits. *Food Sci. Technol. Res.*, **8**(1), 55-58.
 - 17) Liu, Z.-Y. and W.-B. Jiang (2006) : Lignin deposition and effect of postharvest treatment on lignification of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Plant Growth Regulation*, **48**, 187-193.
 - 18) Kader, A. A. (2002) : Postharvest biology and technology: An overview. *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (University of California, Agriculture and Natural Resources), pp. 39-47.
 - 19) 稲葉昭次ら (1980) : トマトの樹上成熟果実及び追熟果実の成熟様相と食味の比較. 園学雑, **49**(1), 132-138.
 - 20) Kasai, Y. *et al.*, (1996): Ethylene Biosynthesis and Its Involvement in Senescence of Broccoli Florets. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **65** (1), 185-191.
 - 21) Reid, M. S. (2002) : Ethylene in Postharvest Technology. *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (University of California, Agriculture and Natural Resources), pp. 149-162.
 - 22) Weichmann, J. *ed.* (1987) : *Postharvest physiology of vegetables* (Marcel Dekker, Inc., New York) .
 - 23) Bramely, P. M. (2002) : Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. *JXB*, **53** (377), 2107-2113.
 - 24) Gil, M. I. *et al.* (1997): Changes in Strawberry Anthocyanins and Other Polyphenols in Responseto Carbon Dioxidetreatments. *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 1662-1667.

- 25) 中野浩平 (2013) : 青果物の鮮度評価方法. 特許第 5326166 号 (2013.8.2) .
- 26) 原光二郎, 佐野浩 (1999) : 傷害. 横田明穂編, 植物分子生理学入門 (学会出版センター, 東京) pp. 217-221.
- 27) 永田雅靖 (2014) : 青果物の鮮度評価方法および鮮度評価用プライマーセット. 特許第 5652778 号 (2014.11.28) .
- 28) 永田雅靖ら (2016) : 遺伝子発現に基づくホウレンソウの鮮度評価法の開発. 日食保蔵誌, 42 (6), 247-253.
- 29) Anonymous (2016): Respiration and Ethylene Production Rates. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks (USDA Agriculture Handbook Number 66), pp. 7-10.
- 30) 今堀義洋 (2006) : 低酸素貯蔵環境における青果物の品質保持と代謝調節機構に関する研究. 日食保蔵誌, 32 (2), 89-98.
- 31) Dan, K. *et al.* (1997): Formation of volatile sulfur compounds in broccoli under anaerobic condition. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 65(4), 867-875.
- 32) Mir, N. and R. M. Beaudry (2016) : Modified Atmosphere Packaging. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks (USDA Agriculture Handbook Number 66), pp. 42-53.
- 33) Nakano, R. *et al.* (2003) : Ethylene Biosynthesis in Detached Young Persimmon Fruit Is Initiated in Calyx and Modulated by Water Loss from the Fruit. *Plant Physiol.*, 131, 276-286.
- 34) Yang, S. Fa. and N. E. Hoffman (1984): Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 35, 155-189.
- 35) Lin, Z. *et al.* (2009) : Recent advances in ethylene research. *JXB*, 60(12), 3311-3336.
- 36) Tatsuki, M (2010) : Ethylene Biosynthesis and Perception in Fruit. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 79(4), 315-326.
- 37) Burg, S. P. and E. A. Burg (1962) : Role of Ethylene in Fruit Ripening. *Plant Physiol.*, 37 (2), 179-189.
- 38) Saltveit, M. E. (1999) : Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Physiol.*, 15, 279-292.
- 39) Risse, L. A. and T. T. Hatton (1982) : Sensitivity of watermelons to ethylene during storage. *HortSci.*, 17, 946-948.
- 40) 矢野昌充 (2003) : キウイフルーツの追熟特性の解明ならびに高品質化に関する研究. 日食保蔵誌, 29 (1), 51-55.
- 41) Morris, L. L. and A. E. Watada (1960) : Elongation and bending of asparagus spears. *California Agric.*, 14 (11), 15.
- 42) 中村怜之輔, 伊東卓爾 (1976) : 振動が果実の呼吸生理に及ぼす影響. 園学雑,

- 45 (3), 313-319.
- 43) Sommer, N. E. *et al.* (2002): Postharvest Disease of Selected Commodities. *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (University of California, Agriculture and Natural Resources), pp. 197-249.
 - 44) 辰巳保夫 (2007) : 収穫後の生理機能の低下および生理障害. 茶珍和雄編, 園芸作物保蔵論 (建帛社, 東京) pp. 193-203.
 - 45) 永田雅靖編, 野菜の最適貯蔵条件.
<http://cse.naro.affrcgo.jp/mnagata/page015.html>
 - 46) Lurie, S. *et al.* (1996) : Reversible Inhibition of Tomato Fruit Gene Expression at High Temperature. *Plant Physiol.*, **110** (4), 1207-1214.
 - 47) Yamauchi N. (2013) : Quality Maintenance of Postharvest Horticultural Crops by Stress Treatments and Approach for the Elucidation of Its Mechanism. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **82** (1), 1-10.
 - 48) 安藤泰雅ら (2017) : 食品の冷凍および解凍に関する技術開発の現状と今後の課題. 日食科工誌, **61** (8), 391-428.
 - 49) 科学技術庁資源調査会 (1965) : 食生活の体系的改善に資する食料流通体系の近代化に関する勧告.
 - 50) 岩田隆, 緒方邦安 (1971) : コールド・チェーンにおける青果物の品質保持と温度許容度に関する研究 (第1報). 園学雑, **40** (4), 437-443.
 - 51) Cantwell, M. (2002): Summary table of optimal handling conditions for fresh produce. *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (University of California, Agriculture and Natural Resources), pp. 511-518.
 - 52) 今堀義洋 (2007) : 環境ガス条件の変更による貯蔵. 茶珍和雄編, 園芸作物保蔵論 (建帛社, 東京) pp. 301-312.
 - 53) 鈴木芳孝ら (2003) : 新簡易包装 (パーシャルシール包装) によるニラの鮮度保持技術の開発. 日食保蔵誌, **29** (3), 141-146.
 - 54) Guo, Y. *et al.* (2013) : Effect of controlled atmospheres with varying O₂/CO₂ levels on the postharvest senescence and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) florets. *Eur. Food Res. Technol.*, **237**, 943-950.
 - 55) 山下市二ら (1997) : 市販エチレン除去剤 (剤) および天然資材のエチレン除去特性の評価. 日食保蔵誌, **23** (3), 119-125.
 - 56) Blankenship, S. M. and J. M. Dole (2003) : 1-Methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biol. Technol.*, **28**, 1-25.
 - 57) 細田浩ら (1981) : 野菜の収穫後における品質に及ぼす光の影響 (第2報) コマツナ (attached leaf) の貯蔵中における成分変化. 食総研報, **38**, 40-45.
 - 58) 吉田千恵ら (2014) : 催色期に収穫したカラーピーマン果実の着色促進に関する要因について. 園学研, **13** (2), 155-160.

- 59) 永田雅靖ら (2015) : 収穫したカラーピーマン果実に対する光照射に伴うカロテノイド生合成関連遺伝子の発現変化. 園学研, **14** (4), 391-396.
- 60) 高附亜矢子ら (2016) : 収穫後の近赤外光照射が数種葉菜類の蒸散, 気孔開度および外観品質に及ぼす影響. 園学研, **15** (2), 197-206.
- 61) 上田悦範 (1981) : 青果物の減圧貯蔵. 食品と低温, **7**, 124-130.
- 62) Baba, T. and F. Ikeda (2003) : Use of high pressure treatment to prolong the postharvest life of mume fruit (*Prunus mume*). *Acta Horticulturae*, **628**, 373-377.
- 63) 佐藤和憲 (2011) : 業務用需要に対応した野菜産地の販売戦略と組織体制. フードシステム研究, **18** (1), 41-45.
- 64) 永田雅靖 (2002) : キャベツ. 長谷川美典編著, カット野菜実務ハンドブック (サイエンスフォーラム, 東京), pp. 81-89.
- 65) 厚生労働省 (2012) : 健康日本 21 (第二次) 分析評価事業
http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/kenkou/kenkounippon21/kenkounippon21/
- 66) 平成 26 年度食品流通段階別価格形成調査報告
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Pdfdl.do?sinfid=000031531290>
- 67) 平成 28 年度食料需給表 (総合自給率等の推移)
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000031672966>
- 68) 平成 28 年度食料需給表 (概算値)
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000031610050>
- 69) 6 次産業化の商品事例集
http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renkei/6jika/attach/pdf/syohin_jirei-2.pdf
- 70) タンマウオン マナスイカン (2014) : 青果物の輸送時における衝撃ストレス応答解析に関する生理学的研究. 日食保蔵誌, **40** (2), 79-85.
- 71) Teranishi, K. and M. Nagata (2016): Structure of a Precursor to the Blue Components Produced in the Blue Discoloration in Japanese Radish (*Raphanus sativus*) Roots. *J. Natural Products*, **79**(5), 1381-1387
- 72) 永田雅靖, 寺西克倫 (2016) : 種子を用いたダイコン青変症リスク評価法. 野茶研報, **15**, 29-33.
- 73) 椎名武夫 (2003) : 食品の老化と鮮度の劣化. 津志田藤二郎編著, 食品と劣化 (光琳, 東京), pp. 205-257.