

# カンキツ果実のカロテノイド集積に及ぼす 温度とエチレンの作用

(独)農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所 カンキツ研究領域 松本 光

## 1. カンキツ果実のカロテノイド

カロテノイドは黄色や橙色の色素成分で、カンキツ果実の色を決定する重要な要素であるほか、一部のカロテノイドは、ビタミンA効力等のヒトの栄養成分としての働きがある。ウンシュウミカン、カンキツの中でもカロテノイドを豊富に含有する品種の一つで、カロテノイドの一種である $\beta$ -クリプトキサンチンの含有量が高い (Yano et al., 2005; Matsumoto et al., 2007)。最近の研究から、 $\beta$ -クリプトキサンチン等のカロテノイドには心血管系疾患等の生活習慣病を予防する効果があることが明らかになってきた (Rao et al., 2007)。このため、果実のカロテノイド含量を減らさない収穫後の取り扱い条件を明らかにすることは、果皮色や栄養価等の果実品質を保つ上で重要である。

## 2. カンキツ果実におけるエチレン処理

これまで、収穫後のカンキツ果実において、エチレン処理は、果皮の緑色の色素成分であるクロロフィルを分解することにより、果皮の脱緑を促し、果皮色を良好にする「カラリング」に利用されてきた。このカラリング処理による果皮の脱緑(クロロフィルの分解)は、室温程度の温度で、最も効率よく進行する。このため、カロテ

ノイド集積に及ぼすエチレンの作用に関する研究は、室温程度の限定された温度条件下のみで行われ(Stewart et al., 1972; Wheaton et al., 1973; Rodrigo et al., 2007)、低温条件下では行われてこなかった。

しかし、ウンシュウミカン、収穫後の保存・流通過程(例えば貯蔵、輸送、店頭での陳列等)において低温から高温まで様々な温度条件に遭遇するほか、エチレンを発生する青果物との混載や陳列等により、様々な温度条件下でエチレンに遭遇する可能性があり、低温でのエチレン遭遇がカロテノイド集積に及ぼす影響を研究する必要性が高い。さらに、これまでの研究は、果皮の着色に注目したものが中心であったが、ヒトの栄養成分としての注目度が高まるにつれ、果肉におけるカロテノイド集積に関する研究の重要性が増大してきた。しかし、果肉におけるカロテノイド集積に及ぼす収穫後条件の影響に関しては、知見がほとんどない。

このため、収穫後の異なる温度やエチレンとの遭遇が、ウンシュウミカンの果皮および果肉中のカロテノイド集積に及ぼす影響を解明する研究を行った。本研究により、カンキツ果実のカロテノイド集積に及ぼすエチレンの作用は温度により異なることが解明されたほか、収穫後の

ウンシュウミカン果実のカロテノイド含量を減らさない収穫後の取り扱い条件に関する知見を得たので、ここで紹介する。

### 3. カンキツ果実におけるカロテノイド集積

植物におけるカロテノイドの生合成経路はよく研究されている (図-1)。カロテノイド生合成の第一段階において、カロテノイド生合成酵素である phytoene synthase (PSY) の働きにより、geranylgeranyl pyrophosphate (GGPP) から無色のカロテノイドであるフィトエンが生合成される。その後、phytoene desaturase (PDS) および  $\zeta$ -carotene desaturase (ZDS) によりリコペンが

合成され、成熟期のウンシュウミカン果実においては、その後、lycopene  $\beta$ -cyclase (LCYb) の働きにより、 $\beta$ -カロテンが合成される。 $\beta$ -カロテンは  $\beta$ -ring hydroxylase (HYb) による2段階の水酸化により、 $\beta$ -クリプトキサンチンを経由してゼアキサンチンへ変換され、その後、zeaxanthin epoxidase (ZEP) によりピオラキサンチンが生合成される。この後、ピオラキサンチンは、カロテノイド分解酵素の一つである9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase (NCED) の働きにより分解される。

これまでの研究から、成熟期のカンキツ果実におけるカロテノイド含量は、カロテノイドの生合成量と分解量のバランスで概ね決定される

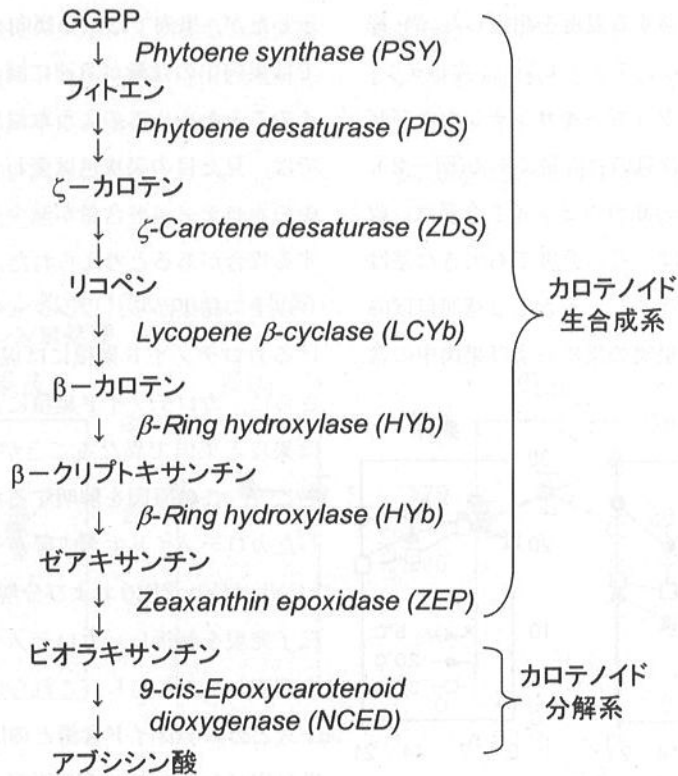


図-1 カロテノイド生合成および分解経路

注：斜体は酵素名を示している。カロテノイド生合成経路には、本図に示した経路の他に、e-ringを有するカロテノイドの生合成経路があるが、本図では省略した。

こと、そして、この生合成量と分解量のバランスは、カロテノイド生合成酵素と分解酵素の遺伝子発現を調査することにより、推定できることが明らかにされてきた(Kato et al., 2004, 2006)。

#### 4. 収穫後の温度がカロテノイド含量および生合成・分解系に及ぼす影響

収穫後の温州ミカン果実を5℃、20℃、30℃の条件下に置き、1週間ごとに果皮および果肉中のカロテノイド含量を調査した(図-2)。概ね、5℃は冷蔵や冬季における貯蔵・輸送中の温度、20℃は常温での店頭陳列や家庭での保存温度を想定した。また、30℃は夏場に出荷されるハウスミカンが遭遇する温度を想定した。尚、総カロテノイド含量は、フィトエン、 $\alpha$ -カロテン、 $\beta$ -カロテン、 $\beta$ -クリプトキサンチンおよびピオラキサンチンの含量の合計量である(図-2)。果皮および果肉中の総カロテノイド含量は、収穫後1週間目までは、どの温度でも大きな差は見られなかった(図-2)。しかし2週間目以降は、20℃に置いた果実の果皮および果肉中の含

量は他の温度に比べて高く推移し、特に果皮の総カロテノイド含量は20℃で顕著に増加した(図-2)。実際、20℃に置いた果実の見た目の果皮色は、他の温度に置いた果実より明らかに良好であった。カンキツでは、収穫後の果実を20℃位の温度条件に置く高温予措という技術がある(長谷川ら, 1983)。この技術が果皮のカロテノイド含量を増大させて、果皮色を改善することは古くから知られていたが、本研究結果により、高温予措は、果皮色を改善するだけでなく、果肉中のカロテノイド含量の維持にも有効で、栄養価の維持に役立つことが明らかとなった。

一方、5℃あるいは30℃においた場合、総カロテノイド含量は、果皮では維持される傾向を示したが、果肉では減少傾向を示し、特に30℃では果肉中の含量が急速に減少した(図-2)。このことから、このような温度に置かれた果実では、見た目の果皮色は変わらなくても、果肉中のカロテノイド含量が減少し、栄養価が低下する可能性があると考えられた。

以上の結果から、ウンシュウミカン果実におけるカロテノイド集積には温度依存性があり、さらに、カロテノイド集積に及ぼす温度の影響は果皮と果肉で異なることが明らかになった。そこで、この原因を解明するため、図-1に示したカロテノイド生合成酵素(PSY, PDS, ZDS, LCYb, HYb, ZEP)および分解酵素(NCED)の遺伝子発現を解析し、カロテノイド含量との関連を調査した。しかし、これらの遺伝子発現バランスとカロテノイド含量との間に、明確な関連は見出せなかった。この原因として、本実験では調査していない酵素遺伝子が収穫後のカロテノイド集積に影響している可能性が考えられる。

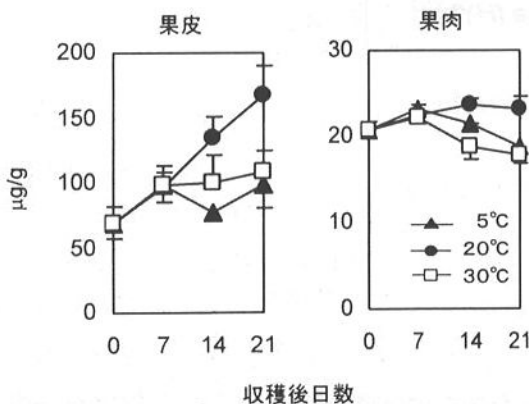


図-2 収穫後の温度が総カロテノイド含量に及ぼす影響

また、本実験の温度条件 (5,20,30℃) が大きく異なるために、遺伝子発現以外の要因(酵素活性等)が影響した可能性が考えられた。

5. 収穫後のエチレンとの遭遇がカロテノイド含量に及ぼす影響

収穫後の果実は、様々な温度条件下でエチレンに遭遇する可能性が考えられる。例えば、エチレンを発生する青果物やカビなどで障害を受けた果実と一緒に、長期間、冷蔵庫程度の低温 (5℃位) や店頭 (20℃位) に置かれる場合等が考えられる。しかし、このような温度条件下でエチレンと遭遇すると、果実のカロテノイド含量がどのように変化するかは詳細に知られていない。そこで収穫後のウンシュウミカン果実を5℃および20℃条件下で、2週間、1000ppmのエチレンを処理し、果皮および果肉中のカロテノイド含量の推移を調査した。尚、本実験で用いたエチレン濃度は高濃度であ

るが、その理由は、本研究が、果皮だけでなく果肉におけるカロテノイド集積に及ぼすエチレンの作用を解明することを目的としているためである。すなわち、通常、果皮に対しては10ppm程度のエチレンで効果があるが、この濃度の場合、果肉中のエチレンは検出できない。そこで、果肉におけるエチレン濃度を10ppm程度(果皮で効果があるとされる濃度)にするために必要なエチレン濃度を検討し、本実験では1000ppmの濃度を使用した。

収穫後の果実を20℃でエチレン処理した場合、2週間後の果皮中の総カロテノイド含量は、無処理の果実に比べて明らかに高くなった(図-3)。このとき、見た目の果皮色も明らかに濃くなった。果肉中のカロテノイド含量は、エチレン処理の有無による差は見られず、収穫直後のカロテノイド含量を維持していた(図-3)。一方、5℃でエチレン処理した場合、2週間後のカロテノイド含量は、果皮および果肉のいずれ

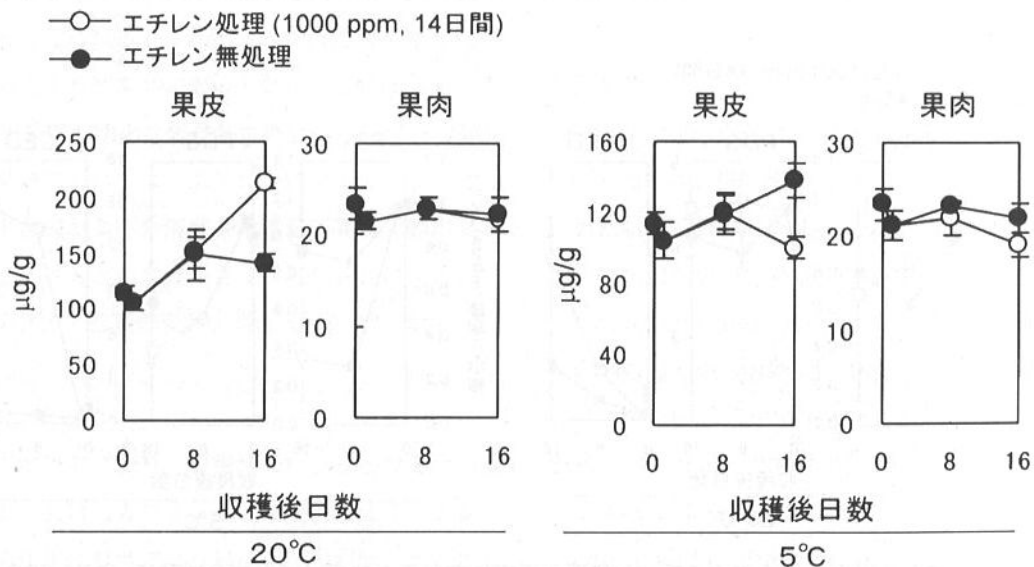


図-3 異なる温度条件下でのエチレン処理が総カロテノイド含量に及ぼす影響

においても、無処理の果実に比べて低くなる傾向を示した。実際、見た目の果皮色は、エチレン処理した果実のほうが、無処理の果実より、やや薄く感じられた。

このことから、収穫後のウンシュウミカン果実のカロテノイド含量に及ぼすエチレンの作用は、温度条件により異なることがわかった。すなわちエチレンは、20℃程度の温度では、果皮中のカロテノイド含量を増強しつつ果肉中の含量も維持するが、逆に、5℃程度の温度では、果皮中のカロテノイド集積を抑制し、果肉中の含量を減少させることが明らかになった。

#### 6. 異なる温度条件下におけるエチレン遭遇がカロテノイド生合成・分解系に及ぼす影響

上記の結果から、収穫後のウンシュウミカン果実においては、エチレンがカロテノイド含量に及ぼす作用が温度によって異なることが明らかになった。そこで、なぜ温度が異なるとカロテノイド集積に対するエチレンの作用性が異なる

のかを、カロテノイド生合成酵素 (PSY, PDS, ZDS, LCYb, HYb, ZEP) および分解酵素 (NCED) の遺伝子発現解析により、果皮および果肉において調査した(図-1)。

果皮においては、5℃でも20℃でも、カロテノイド分解酵素であるNCEDの遺伝子発現は、エチレン処理しなかった果実に比べて、エチレン処理果実で顕著に高かった(図-4)。このことから、果皮においてエチレンは、5℃でも20℃でも、カロテノイドの分解を促進する方向に働く(図-5)。一方、生合成酵素であるPSYとPDSの遺伝子発現は、20℃では、エチレン処理しなかった果実に比べて、エチレン処理果実でやや高く推移したが、5℃では逆に、エチレン処理果実において顕著に低く推移した(図-4)。このことから、20℃に置いたウンシュウミカンの果皮では、エチレンはカロテノイドの分解を促進する一方で、生合成も促進するため、結果的に、カロテノイド含量は減少しなかったと考えられた。これに対し、5℃では分解を促進するほか、生合

○ エチレン処理 (1000 ppm, 14日間)  
● エチレン無処理

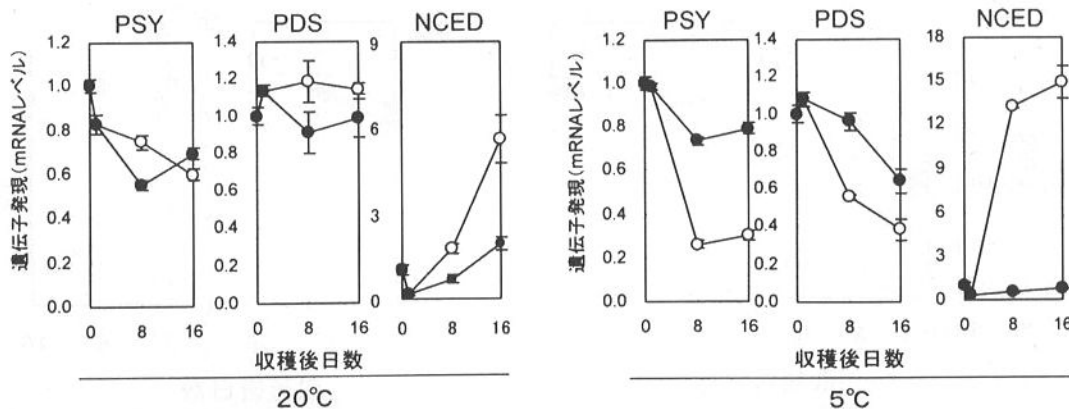


図-4 異なる温度条件下でのエチレン処理が果皮におけるカロテノイド生合成酵素 (PSY, PDS) および分解酵素 (NCED) の遺伝子発現量に及ぼす影響



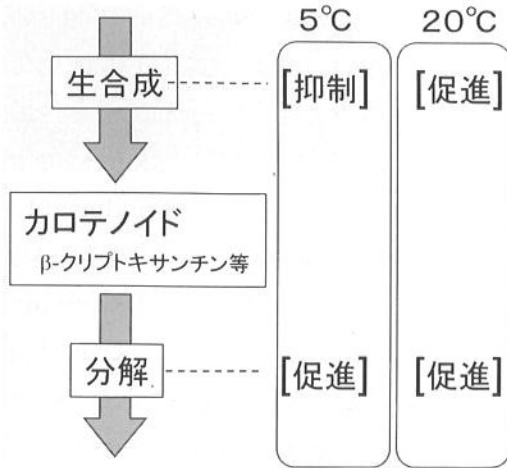


図-5 カロテノイド生合成・分解系に対するエチレン作用性の温度による違い

果も抑制するため、カロテノイド含量が減少したと考えられた(図-4, 5)。

果肉においては、カロテノイド分解酵素(NCED)の遺伝子発現は、果皮と同様に、エチレン処理しなかった果実に比べて、エチレン処理果実において高かった(データ略)。このことから、エチレンは果肉においてもカロテノイドを分解してカロテノイド含量を減らす方向に働くと考えられる。一方、PSYやPDS等の生合成に関連する酵素群の遺伝子の発現変動は、5°Cでも20°Cでも明確な差が見られなかった(データ略)。果肉においては、エチレンによるカロテノイド生合成および分解酵素の遺伝子発現変動が果皮に比べるとかなり小さく、エチレンによるカロテノイド含量の変動が果皮ほど顕著でなかった。

## 7. まとめ

本研究により、収穫後のウンシュウミカン果実におけるカロテノイド集積に及ぼすエチレンの作用は温度により異なることが明らかとなった。20°C程度の温度では、果皮中のカロテノイ

ド含量を増強しつつ果肉中の含量も維持するが、逆に、5°C程度の温度では、果皮中のカロテノイド集積を抑制し、果肉中の含量を減少させることが明らかになった。本研究成果は、ウンシュウミカンの果皮色を維持し、果肉中のカロテノイド含量を減らさないためには、果実を低温で置く場合はエチレンとの遭遇をなるべく避けること、あるいは果実を20°C程度の室温で保持することが望ましいという、収穫後の取り扱い指標の一つを提供するものである。ただし、20°Cという温度は、カロテノイド含量の維持・増強効果に優れるが、数週間程度、この条件下に置かれた場合には、食味関連成分の変動等による品質変化が起こる場合があるため、この点について研究を進めることにより、栄養価だけでなく食味を良好に保つ、果実の収穫後の取扱い技術開発へと発展することが期待される。

本稿は、Journal of Agricultural and Food Chemistry (Matsumoto et al., 2009)で発表した内容を要約したものである。

## 引用文献

- 1) 長谷川美典ら(1984)カンキツ類の貯蔵に及ぼす温度の影響II 貯蔵前の予措温度について、果樹試験場報告. B11, 53-61.
- 2) Kato, M. et al. (2004) Accumulation of carotenoids and expression of carotenoid biosynthesis genes during maturation in citrus fruit. Plant Physiol. 134, 824-837.
- 3) Kato, M. et al. (2006) The role of carotenoid cleavage dioxygenases in the regulation of carotenoid profiles during maturation in citrus fruit. J. Exp. Bot. 57, 2153-2164.

- 4) Matsumoto, H. et al. (2007) Quantification of carotenoids in citrus fruit by LC-MS and comparison of patterns of seasonal changes for carotenoids among citrus varieties. *J. Agric. Food Chem.* 55, 2356-2368.
- 5) Matsumoto, H. et al. (2009) Effect of postharvest temperature and ethylene on carotenoid accumulation in the flavedo and juice sacs of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruit. *J. Agric. Food Chem.* 57, 4724-4732.
- 6) Rao, A.V. et al. (2007) Carotenoids and human health. *Pharmacol. Res.* 55, 207-216.
- 7) Rodrigo, M.J. et al. (2007) Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthetic genes in the flavedo of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 43, 14-22.
- 8) Stewart, I. et al. (1972) Carotenoids in citrus: their accumulation induced by ethylene. *J. Agric. Food Chem.* 20, 448-449.
- 9) Wheaton, T. A. et al. (1973) Optimum temperature and ethylene concentration for postharvest development of carotenoid pigments in citrus. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 98, 337-340.
- 10) Yano, M. et al. (2005) Quantitation of carotenoids in raw and processed fruits in Japan. *Food Science and Technology Research*, 11, 13-18.

この草はなんだろう? 手軽に調べたい。

## 三二雑草図鑑

— 耕地雑草ハンドブック —

廣田伸七／著

A5判 定価2,200円＋税

新装版

## 原色 図鑑 芽ばえとたね

浅野 貞夫／著

A4判 定価9,000円＋税

耕地には主要なものだけで150種を超える雑草が生えてきます。これら雑草の防除の第一歩は草を知ることです。本書は、農耕地や樹園地などによく見られる雑草500種を収録し、主要種は、幼植物・生育中期・成植物と生育段階を追った写真を掲載。また、似た草の見分け方を記載した、身近な植物を調べるための最適な図鑑です。

芽ばえの姿はどうなんだろう。本書は、植物の芽ばえのようすを克明に表した精密図版と、種・成植物の写真を組み合わせた植物の一生図鑑です。成植物のみの図鑑と異なり、芽ばえのようすから紹介しているため、植生などの調査にたいへん役に立つとの声が寄せられています。

全国農村教育協会

〒110-0016 東京都台東区台東1-26-6  
TEL.03-3833-1821 FAX.03-3833-1665