

## 4 カロテノイド

農研機構 北海道農業研究センター  
畑作物開発利用研究領域 上級研究員

いしぐる こうじ  
石黒 浩二

### 4.1 カロテノイドの基礎知識と特徴

カロテノイドは、赤、橙、黄色を呈し、微生物、藻類、植物、動物に広く分布し、これまでに750種以上のカロテノイドが報告されている<sup>1)</sup>。植物では、光合成色素として重要な役割を果たしている。動物は、食餌としてカロテノイドを摂取し、そのまま、あるいは代謝して利用する。ヒトの血中中には、主に $\beta$ -カロテン、 $\alpha$ -カロテン、リコペン、 $\beta$ -クリプトキサニン、ゼアキサニン、ルテインが含まれている。 $\beta$ -カロテン、 $\alpha$ -カロテン、 $\beta$ -クリプトキサニンなどは体内に吸収されると一部はビタミンAに変換される<sup>2)</sup>。また、抗酸化性、抗アレルギー作用、抗動脈硬化作用、抗糖尿病作用、眼病予防作用など様々な生理活性も報告されている。さらに近年では化粧品にも利用されている<sup>3)</sup>。

カロテノイドは、基本的に炭素数40の基本骨格を持つテトラテルペン色素であり、中央に9個の共役二重結合からなるポリエン鎖とその両端にエンドグループが結合した構造をしている。炭素と水素原子のみで構成されるカロテン類と、酸素原子（水酸基、ケトン基、カルボキシル基など）を持つキサントフィル類に分けられる<sup>1)</sup>。

サツマイモには、塊根の肉色が白、黄白、黄、橙、紫色等を呈する品種が存在するが、

黄や橙色はカロテノイドによるものである。また、茎葉にもカロテノイドが含まれており、これを活かした利用がなされている。本稿ではこれらのカロテノイドと、黄・橙肉色品種、茎葉利用品種とその利用、および抗酸化作用等について紹介する。

### 4.2 黄および橙色サツマイモのカロテノイド

#### 4.2.1 黄肉色と橙肉色サツマイモ品種と、その特徴

$\beta$ -カロテンを多く含有する橙肉色の品種として、鹿児島県で大正時代から「隼人いも」が栽培され、その肉色から“にんじんいも”や“かぼちゃいも”とも呼ばれていた。1985年にアメリカの橙肉色品種「センチニアル」を利用した交配育種により、「ベニハヤト」が育成された。「ベニハヤト」のカロテノイド含量は、「隼人いも」の約3倍であり、現在も菓子原料として鹿児島県の一部で栽培されている。1997年には「農林ジェイレッド」が育成された。乾物率が低く搾汁率が高い。搾汁率は変色が少なく臭いも少ないことから、主にジュース用として利用されている。収量性やセンチウ抵抗性にも優れる。1998年に育成された「サニーレッド」は、乾物率が橙肉色系では最も高く、主にパウダー用として利用される。



図1 アヤコマチの塊根と肉色

2003年に育成された「アヤコマチ」は、外觀が優れ、食味も良いことから、食用やサラダなどの惣菜として利用される（図1）。2003年に育成された「ハマコマチ」は、橙肉色の干しいも用として利用されている。2009年に育成された「タマアカネ」は、カロテノイドに由来する味や香りが特徴の焼酎や醸造酒として利用されている。

黄肉色の代表的な品種としては、1945年に育成された「高系14号」と1984年に育成された「ベニアズマ」が挙げられる。「高系14号」は、全国各地で広く栽培され、その派生系統は“なると金時”、“紅さつま”、“五郎島金時”、“土佐紅”、“宮崎紅”などのブランド名で知られる。西日本を中心に食用や加工用として利用されている。「ベニアズマ」は、粉質で甘みが強い良食味品種として東日本を中心に栽培されている。「ベニアズマ」の育成後、黄肉色の食用または加工用品種として「ベニオトメ」、「春こがね」、「タマオトメ」、「べにまさり」、「クイックスweet」、「べにはるか」、「ひめあやか」、「あいこまち」などが育成された。2007年に育成された「べにはるか」は、上品な甘みがあり、やや粘質で口当たりが良い良食味品種であり、茨城県、千葉県、鹿

児島県、大分県、熊本県等で急速に普及が広がっている。食用のほか干しいもにも適している。鹿児島県では、種子島地域の在来品種「安納いも」を選抜し、1998年に「安納紅」と「安納こがね」を品種登録した。しっとりした食感と甘さが特徴で人気がある。

#### 4.2.2 黄肉色と橙肉色サツマイモのカロテノイド含量と組成

橙肉色サツマイモに含まれるカロテノイドは、その大部分が $\beta$ -カロテンであり、その含量の品種間差について多くの報告がある。一方、黄肉色サツマイモは、日本では一般的であるにも関わらず、黄色を呈する色素成分については明らかではなかった。そこで、我々は、まず黄肉色サツマイモ「べにまさり」に含まれる色素成分は、7つの既知カロテノイド（ $\beta$ -カロテン、 $\beta$ -カロテン5,8-エポキシド、 $\beta$ -カロテン5,8,5'8'-ジエポキシド、 $\beta$ -クリプトキサンチン5,8'-エポキシド、 $\beta$ -クリプトキサンチン5,8,5'8'-ジエポキシド、オーロキサンチン、ネオクローム）に加えて、4つの新規カロテノイドであることを見出した<sup>4)</sup>。これらの新規カロテノイドは、(5*R*,6*S*,3'*R*)-5,6-dihydro- $\beta,\beta$ -carotene5,6,3'-triol、(5*R*,6*S*,5'*R*,6'*S*)-5,6,5',6'-tetrahydro- $\beta,\beta$ -carotene-5,6,5',6'-tetrol、(5*R*,6*S*,5'*R*,8'*R*)-5',8'-epoxy-5,6,5',8'-tetrahydro- $\beta,\beta$ -carotene-5,6-diol、(5*R*,6*S*,5'*R*,8'*S*)-5',8'-epoxy-5,6,5',8'-tetrahydro- $\beta,\beta$ -carotene-5,6-diolと同定され、それぞれイポメアキサンチンA、B、C1、C2と名づけられた（図2A）。

次に、黄肉色および橙肉色サツマイモの高速液体クロマトグラフィー（HPLC）による分析条件を確立し、黄肉色8品種およ

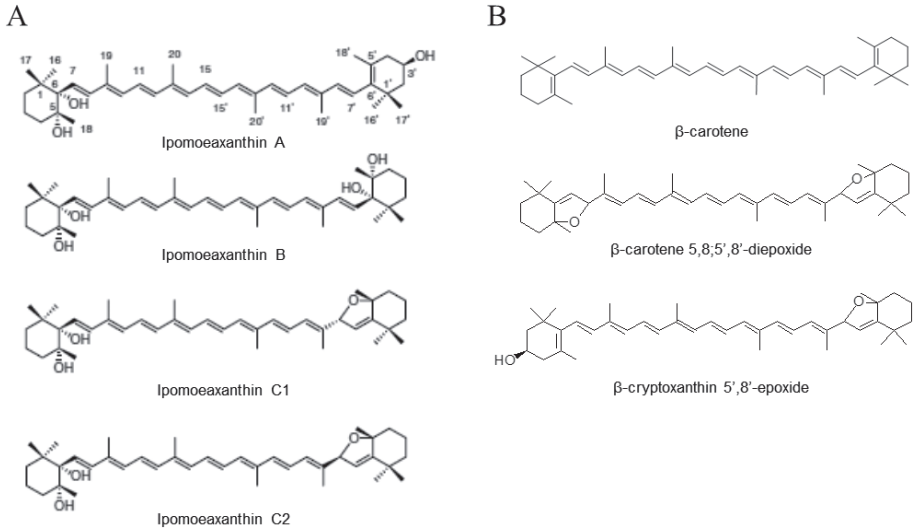


図2 サツマイモに含まれる新規カロテノイド (A) と含有量が多いカロテノイド (B)

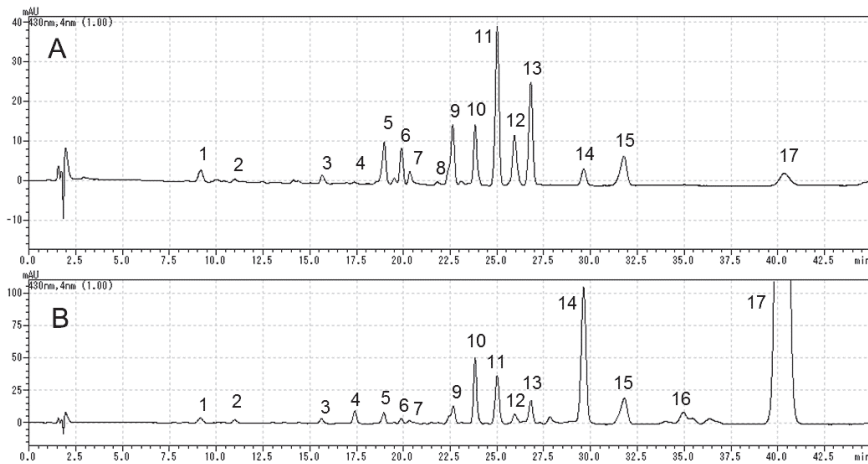


図3 黄肉色サツマイモに含まれるカロテノイド (A) と橙肉色サツマイモに含まれるカロテノイド (B)。

ピーク1、未知成分；2、未知成分；3、イポメアキサンチンA；4、未知成分；5、未知成分；6、イポメアキサンチンC1；7、イポメアキサンチンC2；8、 $\beta$ -クリプトキサンチン 5,8,5',8'-ジエポキシド；9、 $\beta$ -クリプトキサンチン 5,8-エポキシド；10、未知成分；11、 $\beta$ -カロテン 5,8,5',8'-ジエポキシド (シス異性体)；12 and 13、 $\beta$ -カロテン 5,8,5',8'-ジエポキシド (ジアステレオマー)；14、未知成分；15、 $\beta$ -カロテン 5,8-エポキシド；16、未知成分；17、 $\beta$ -カロテン。

び橙肉色4品種のカロテノイド組成と含量を評価した<sup>5)</sup>。上記の成分に未知の成分を加えた17種のカロテノイドについて分析したところ、黄肉色サツマイモと橙肉色サツマイモのカロテノイド成分はほぼ共通であり、その成分割合と総含量が大きく異なることが明らかとなった(図3)。黄肉色サツマイモのカロテノイドの主成分は、 $\beta$ -

カロテン5,8,5',8'-ジエポキシド(約32-51%)、 $\beta$ -クリプトキサンチン5,8'-エポキシド(約11-30%)であった(図2B)。一方、橙肉色サツマイモは $\beta$ -カロテンが主成分であり、約80-92%を占めた。総カロテノイド含量は、黄肉色サツマイモが0.5-1.5 mg/100g 生鮮重、橙肉色サツマイモが4.3-13.3 mg/100g 生鮮重であった(表1)。

表1 黄および橙肉色サツマイモの総カロテノイド含量 (mg/100g 生鮮重)

品種・系統名	肉色 <sup>a</sup>	平均 <sup>b</sup>	標準偏差(n=5)	
べにはるか	黄白	0.5	0.1	a <sup>c</sup>
高系14号	黄白	0.7	0.1	ab
九州138号	黄白	0.8	0.1	bc
九系280	淡黄	1.0	0.1	bcd
べにまさり	淡黄	1.1	0.1	cd
九州149号	淡黄	1.2	0.1	d
九州121号	黄	1.2	0.1	d
タマオトメ	黄	1.5	0.1	e
ジェイレッド	橙	4.3	0.3	
ベニハヤト	橙	7.6	1.4	
ハマコマチ	橙	12.1	6.0	
サニーレッド	橙	13.3	1.4	

<sup>a</sup> 目視による評価。<sup>b</sup> カロテノイドの吸光係数E=2500 (λmax)により計算。<sup>c</sup> 英異文字間で有意差あり (p<0.01, Tukeyの多重比較検定)。

カロテノイドの生合成経路では、β-クリプトキサンチンはβ-カロテンの一方のβ環に水酸基が結合することによって生成する。β-カロテンの生成とβ-カロテンのエポキシ化およびβ-クリプトキサンチンへの代謝さらにはそのエポキシ化のバランスにより橙色あるいは黄色の色調を呈すると思われる。つまり、β-カロテンを多く蓄積するものは橙肉色、β-カロテンの代謝物であるβ-カロテンエポキシドおよびβ-クリプトキサンチンエポキシドが多く蓄積するものは黄肉色を呈することが示唆された。

#### 4.3 サツマイモ「すいおう」葉身部に含まれるルテイン

サツマイモの茎葉部は、高い栄養価があるが食味が良くないため、一部の地域を除

いてあまり利用されてこなかった。そこで、栄養価を活かし食味が改善された茎葉利用品種が開発された。まず、飼料用として「ツルセンガン」が1981年に育成された。1996年に育成された「エレガントサマー」は、葉柄収量が高く、食味が良く、惣菜の原料に適する。そして、2004年に育成された「すいおう」は、地上部収量が著しく高く、葉身および葉柄部の食味が優れる<sup>6)</sup>。ビタミン、ミネラルおよびポリフェノール含量が高く、青汁の原料や菓子素材として利用されている。

サツマイモの葉身部には、β-カロテンやルテインが豊富に含まれる(図4)。ルテインとはカロテノイドのキサントフィルの一種であり、野菜や果物に含まれている黄色～橙色の色素成分である。ルテインはヒトの体内において水晶体や網膜黄斑部などに存在し、活性酸素を誘発する青色光のフィルターとして働くとともに、生成した活性酸素を消去すると考えられている<sup>7)</sup>。欧米における疫学調査や介入試験において、ルテインの摂取は黄斑変性症や白内障などの眼病疾患予防に有効とされている<sup>8-11)</sup>。また、ルテインは心疾患予防<sup>12)</sup>や皮膚の紫外線保護<sup>13)</sup>にも効果があるとされる。

「すいおう」の葉身に含まれるルテイン含量は平均36.8 mg/100g 新鮮重であり、サツマイモと同じヒルガオ科のエンサイ

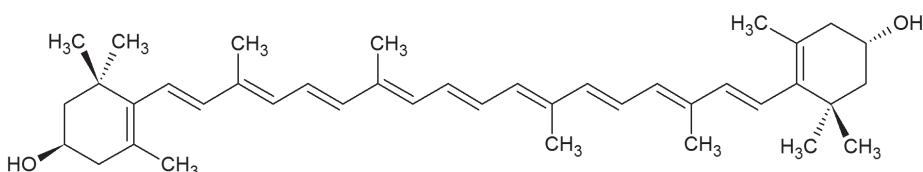


図4 サツマイモ茎葉に含まれるルテイン

表2 サツマイモ「すいおう」茎葉部のルテイン含量

	ルテイン含量 (mg/100 g)	
	平均値 (中央値)	最小値-最大値
すいおう		
葉身	36.8 (37.7)	31.5-42.6
茎	1.8 (2.2)	0.6-3.0
葉柄	1.6 (2.0)	0.4-2.8
エンサイ	11.9 (12.4)	8.5-14.5
ケール <sup>1</sup>	(21.9)	14.7-39.6
ハウレンソウ <sup>1</sup>	(10.2)	4.4-15.9
ブロッコリー <sup>1</sup>	(1.9)	1.8-2.1
レタス <sup>1</sup>	(1.8)	-
グリーンピース <sup>1</sup>	(1.7)	1.1-2.4

<sup>1</sup> Mangels et al.<sup>18)</sup>から引用

表3 サツマイモカロテノイドのABTSラジカル消去活性

ピーク No.	カロテノイド	IC <sub>50</sub> (μM)
3	イポメアキサンチン A	6.7
6,7	イポメアキサンチン C1 + C2	8.6
9	β-クリプトキサンチン 5,8-エポキシド	17.8
11	β-カロテン 5,8,5',8'-ジエポキシド (cis)	9.8
12,13	β-カロテン 5,8,5',8'-ジエポキシド	10.2
17	β-カロテン	6.6

(空芯菜) (11.9 mg/100g) や、ケール (21.9 mg/100g) や ハウレンソウ (10.2 mg/100g) など他の野菜を上回る (表2)。これまで報告されている野菜、果物の中で最も高含量の範疇に属すると思われる。

#### 4.4 橙・黄肉色サツマイモおよびサツマイモカロテノイドの抗酸化性

カロテノイドは脂溶性の抗酸化成分として、動物の生体膜などにおいて活性酸素を除去する役割をしている。沖ら<sup>14)</sup>は、橙肉色および黄肉色サツマイモの抗酸化性 (ABTSラジカル消去活性) を評価した。その結果、β-カロテンを多く含有する橙肉色サツマイモでは、ラジカル消去活性に対するβ-カロテンの寄与率は50%以上で

あるあることを明らかにした。一方、黄肉色サツマイモでは、β-カロテンの寄与率は低く、他の脂溶性抗酸化成分の存在が示唆された。

我々は、黄肉色および橙肉色サツマイモに含まれるカロテノイド成分のABTSラジカル消去活性を評価した<sup>5)</sup>。その結果、イポメアキサンチンAはβ-カロテンとほぼ同じ活性を示し、黄肉色サツマイモに多く含まれるβ-カロテン 5,8,5',8'-ジエポキシドやβ-クリプトキサンチン 5,8-エポキシドはβ-カロテンより弱い活性を示した (表3)。これらのカロテノイドが生体内でどのように代謝され、抗酸化活性を示すかについては今後の課題である。



#### 4.5 今後の展開

黄～赤色を呈する色調は食欲をそそり、食卓を彩る。ここ20～30年の間に多くの黄および橙肉色サツマイモが育成され、惣菜、ジュース、菓子類、焼酎など幅広く利用されるようになった。今後はさらにカロテノイドを多く含有する品種が育成され、塊根あるいは茎葉の機能性効果が検証されることを期待したい。橙肉色サツマイモは、アメリカ合衆国では一般的に利用されているが、アフリカやアジアの貧困地域でも導入が進められている。これらの地域では、深刻なビタミンA欠乏症で、多くの子供や妊産婦が苦しんでいる。高畑ら<sup>15)</sup>は代表的な橙肉色サツマイモのレチノール当量活性は、平均2.8 mg/100gであり、ニンジンの値 (1.2-2.3 mg/100g) と遜色ないことを報告しており、ビタミンA欠乏症の克服に貢献できる可能性がある。実際、橙肉色サツマイモを摂取したケニアやインドネシアの子供や妊婦では血清中レチノール量が増加した<sup>16,17)</sup>。アフリカ諸国では、橙肉色サツマイモ粉末を添加したパン、クッキー、ジュース、チップス等を作製し、ビタミンA摂取量を増やす取り組みが行われている。サツマイモはカロテノイドだけではなく、適切なカロリー、ビタミン、ミネラル等を摂取できるため、これらの地域において理想的な食品である。今後も我が国や世界中で、カロテノイド含有サツマイモがさらに利用されることが望まれる。

#### 引用文献

- 1) 眞岡孝至 (2012) 天然カロテノイドの分析と構造研究. オレオサイエンス、12 (10) : 485-494.
- 2) 高市真一 (2012) カロテノイドとヒト. 日医大医学会誌、8 (4) : 264-267.
- 3) 宮下和夫 監修 (2009) カロテノイドの科学と最新応用技術、シーエムシー出版.
- 4) Maoka, T., Akimoto, N., Ishiguro, K., Yoshinaga, M., and Yoshimoto, M. (2007) Carotenoids with a 5,6-dihydro-5,6-dihydroxy-C-end group, from yellow sweet potato "Benimasari", *Ipomoea batatas* LAM. *Phytochemistry* 68: 1740-1745.
- 5) Ishiguro, K., Yoshinaga, M., Kai, Y., Maoka, T., and Yoshimoto, M. (2010) Composition, content and antioxidative activity of the carotenoids in yellow-fleshed sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.). *Breeding Science* 60:324-329.
- 6) Ishiguro, K., Toyama, J., Islam, M.S., Yoshimoto, M., Kumagai, T., Kai, Y., Nakazawa, Y. and Yamakawa, O. (2004) Suioh, a new sweetpotato cultivar for utilization in vegetable greens. *Acta Horticulturae*. 637: 339-345.
- 7) Alves-Rodrigues, A. and Shao, A. 2004. The science behind lutein. *Toxicology Letters* 150: 57-83.
- 8) Seddon, J.M., Ajani, U.A., Sperduto, R.D., Hiller, R., Blair, N., Burton, T.C., Farber, M.D., Gragoudas, E.S., Haller, J., Miller, D.T., Yannuzzi, L.A. and Willett, W. 1994. Dietary Carotenoids, vitamins A, C, and E, and advanced age-related macular degeneration.

- Eye Disease Case-Control Study Group. *Jam.* 272: 1413-1420.
- 9) Gale, C.R., Hall, N.F., Phillips, D.I. and Martyn, C.N. 2001. Plasma antioxidant vitamins and carotenoids and age-related cataract. *Ophthalmology* 108: 1992-1998.
- 10) Massacesi, A.L., Faletra, R., Gerosa, F., Staurengi, G. and Orzalesi, N. 2001. The effect of oral supplementation of macular carotenoids (lutein and zeaxanthin) on the prevention of age-related macular degeneration: a 18 months of follow up study. *Assoc. Res. Vision Ophthalmol.* 42: S234.
- 11) Olmedilla, B., Granado, R., Blanco, I. and Vaquero, M. 2003. Lutein, but not alpha-tocopherol, supplementation improves visual function in patients with age-related cataracts: a 2-year double-blind, placebo-controlled pilot study. *Nutrition* 19: 21-24.
- 12) Mares-Perlman, J.A., Millen, A.E., Ficek, T.L. and Hankinson, S.E. 2002. The body of evidence to support a protective role for lutein and zeaxanthin in delaying chronic disease. *Overview J. Nutr.* 132: 518S-524S.
- 13) Stahl, W., Heinrich, U., Jungmann, H., Sies, H. and Tronnier, H. 2000. Carotenoids and carotenoids plus Vitamin E protect against ultraviolet light-induced erythema in humans. *Am. J. Clin. Nutr.* 71: 795-798.
- 14) Oki, T., Nagai, S., Yoshinaga, M., Nishiba, Y., and Suda, I. (2006) Contribution of b-carotene to radical scavenging capacity varies among orange-fleshed sweet potato cultivars. *Food Science and Technology Research* 12:156-160.
- 15) Takahata, Y., Noda, T. & Nagata, T. (1993) HPLC determination of b-carotene content of sweet potato cultivars and its relationship with color values. *Japanese Journal of Breeding*, 43:421-427.
- 16) Hagenimana, V., Oyunga, M. A., Low, I., Njoroge, S. M., Gichuki, S. T., & Kabira, J. (1999). The effects of women farmer's adoption of orange-fleshed sweet potatoes: Raising vitamin A intake in Kenya. Washington, DC: International Center for Research on Women. June 1999. Research Report Series 3.
- 17) Jalal, F., Nesheim, M. C., Agus, Z., Sanjur, D., & Habicht, J. P. (1998). Serum retinol concentrations in children are affected by food sources of beta-carotene, fat intake, and anthelmintic drug treatment. *American Journal of Clinical Nutrition*, 68 (3), 623-629.
- 18) Mangels, A.R., Holden, J.M., Breecher, G.R., Forman, M.R. and Lanza, E. 1993. Carotenoid content of fruits and vegetables: An evaluation of analytic data. *J. Am. Diet. Assoc.* 93: 284-296.