トマト strains におけるカロチノイドに関する研究

(第1報) Beta orange strain の Red strain への導入に伴う
カロチノイドの生成量について

広 田 才 之*

Studies on the Carotenoid Constitution of Various Tomato Strains

Part I. With reference to carotenoid content of hybrid strain
introduced to Red with Beta orange

SAISHI HIROTA*

Carotenoid contents and coloring of the tomato strain of F_1 hybrids of Beta orange strain crossed with Red strain were compared with other strains. In Red strain gene B is absent and by introducing Beta orange strain into Red strain, it is thought that gene B is to be dominant. Genotype in all F_1 fruits is the heterozygous B^+B and genotype B^+B blocks lycopene production and produces about the same amount of β -carotene instead of lycopene.

Following results were obtained.

- (1) Lycopene content of Red strain decreased from 50~70 $\mu\text{g/g}$ to 15~30 $\mu\text{g/g}$ in F_1 hybrid and 25 $\mu\text{g/g}$ of β -carotene was produced.
- (2) The content of β -carotene in F_1 hybrid was higher than that of Red strain but lower than that of Beta orange strain. The variation of γ -carotene content among three strain was little with the range from 0.5 to 2.5 $\mu\text{g/g}$.
- (3) Fruit coloring of F_1 hybrid varied from pale orange-red to deep orange-red. These coloring were mainly affected by the pigment contained in fruit skin. In the case of colorless skin, the external appearance of the fruit showed a pale and uneven coloring. On the contrary, the fruit coloring having the orange skin, showed the same as the appearance of Red strain.

(Received Oct. 16, 1974)

トマト (*L. esculentum*) の果実 (以下トマトという) の赤い色調は主として lycopene によるが分離系や変異種系などのように系統的な相違からカロチノイドの組成も差異を生じ、それらの色調も黄色、黄橙色、橙色および橙赤色のものなどを生ずる。

トマトのカロチノイド生成に関する研究では、分離系や変異種系など典型的な遺伝子型 (genotype で以下遺伝子型という) をもつ系統種 (各 strain を一括してよぶ場合はここでは系統種という) を用い、それらの交配雑種に含まれるカロチノイド組成の面から遺伝因子 (gene のことをここでは遺伝因子といい、特定のものにはその記号をつけて遺伝子という) を想定し、その機能について種々の報告が行なわれている。いま主な研究の歴史的経過を要約すると次のようになる。

McARTHUR ら¹⁾²⁾ はトマトの色調を調べるに当たり、まず Yellow strain (黄色系トマト) と Tangerine strain (黄橙色系トマト) の2つの劣勢系 (recessive mutant) を交配して得られる F_1 雑種がすべて赤色を呈することから、lycopene の生成に関与する遺伝因子は2つあってそれらは相異なった染色体上に位置するものと考え、それらに R (優勢); r (劣勢), T (優勢); t (劣勢) の2組の遺伝子記号を与えた。現在は R は r^+ , T は t^+ として一般に用いられているので以下これらの記号に従うと次のように示される。

Yellow $\times$ Tangerine $\rightarrow$ Red (F_1)

$rrt^+t^+ \quad r^+r^+tt \quad r^+r^+t^+t$

$r\{ \}t^+ \quad r^+\{ \}t$

すなわち Yellow strain には rrt^+t^+ , Tangerine

* 日本大学農獣医学部 (東京都世田谷区下馬)

College of Agriculture and Veterinary Medicine, Nihon University, Setagaya, Tokyo.

strain には $r^+r^+t^+t^+$ を、そして F_1 には heterozygous (異型接合) として $r^+r^+t^+t^+$ の遺伝子型を与えた。またこの F_2 雑種は赤色系 9, 黄色系 3, 黄橙色系 3 および淡黄橙色系 1 の割合に分離し、これらのうち赤系のなかの 9 分の 1 は homozygous (同型接合) として $r^+r^+t^+t^+$ の遺伝子型をもって濃赤色を呈し、マーグローブなどの普通の赤色品種はこれに当たる。ついで ZECHMEISTER ら⁸⁾⁵⁾ が、トマトのカロチノイドの分析について、ことに、シス-トランス 立体異性体などの吸光分析法を確立して以来トマトの外観的な色調に加えて、その裏付けともなるカロチノイド組成の面と遺伝形質とを組み合わせ、交配雑種の分離比を検討することが行なわれるようになった。Table 1 にトマトの species を色調の上から分類¹¹⁾したものを示した。

ついで LINCOLN, PORTER ら⁶⁾ によって *L. hirsutum*

Table 1. Species of tomato¹¹⁾

Green-fruited species	$\left\{ \begin{array}{l} L. peruvianum, L. hirsutum, \\ L. minutum, L. chilense \end{array} \right.$
Orange-fruited species	$\left\{ \begin{array}{l} L. pimpinellifolium \text{ (Galapagos} \\ \text{Islands). } cheesemaniai \end{array} \right.$
Red-fruited species	$\left\{ \begin{array}{l} L. pimpinellifolium \text{ (South Ame-} \\ \text{rican continent), } L. esculentum \end{array} \right.$

L. Lycopersicon

から *L. esculentum* に導入され、さらに *L. esculentum* に対して戻し交配 (back cross) を経て、変異種として分離確認された Beta orange strain において見いだされた B 遺伝子は, lycopene の生成を著しく減耗し、その lycopene の減少に相当する量の β -carotene を生成する。これは B 遺伝子の関与により lycopene 生成系のなかの中間物質 neurosporene から β -carotene への変換が行なわれるものと考えられている⁷⁾。

B 遺伝子を表示する場合、マーグローブ品種のように主に lycopene を生成する赤色トマトのもっている遺伝形質の状態においては、 B 遺伝子は欠失 (absence) しているとして通常 B^+ の記号を用いる。従って Red strain で homozygous には B^+B^+ を、heterozygous には B^+B をもって示される。また高含量の β -carotene を生成する遺伝形質の状態については B^+ に対応して B の記号を与え、その homozygous には BB が用いられる。そこで Red strain に Beta orange strain が導入されると r, t 遺伝子と B 遺伝子が連鎖されて、その色の表現型 (phenotype で以下表現型という) は橙赤色を呈するに至り、またその遺伝子型は $r^+r^+t^+t^+B^+B$ (通常 t^+t^+ はこの場合略す) となる。

ついで同じく LINCOLN, PORTER ら⁶⁾ によって分離された Delta strain は $r^+r^+ Del Del$ で表わされ、 Del 遺伝子 (Del は現在暫定的に用いられている記号) の関

Table 2. Phenotypes and genotypes of genotypical various mutants and isolates¹¹⁾

Strain (mutants and isolates (Symbol)*	Genotype	Phenotype (fruit characteristics)	Source and remarks
Red	$r^+r^+t^+t^+$ ($r^+r^+t^+t^+at^+at^+B^+B^+Del^+Del^+$)	Large round, red flesh	Marglobe line, marketed, generally
Yellow (r)	rrt^+t^+	Ovate, small with peaked and pubescent, yellow flesh	Yellow group line Used as curiosity, occasionally.
Tangerine (t)	r^+r^+ttt	Uniform size, large and round, orange like yellow flesh.	Golden Jubilee line, Cultivated in some areas.
Apricot (at)	$r^+r^+t^+t^+at at$	Small oblong, yellow flesh	Discovered by Jenkins Puebla, Mexico 1954.
Beta orange (B)	$r^+r^+B B$	Small and round, orange flesh.	Discovered by Tomes and Porter at Purdue, 1953. (Obtained by hybridization)** Hy- β -carotene line.
Delta (Del)	$r^+r^+Del Del$	Large lobate, reddish orange flesh	Discovered by Tomes and Porter at Purdue, 1954. (Obtained by hybridization)**

The plus sign indicates the condition of the gene in the red-fruited variety as Marglobe. Thus r^+, t^+, B^+, Del^+ are the situation where lycopene predominates in a red-fruited species and r, t, B, Del do not exist in this condition in Marglobe.

r, t etc. are recessive to r^+, t^+ etc.

B, Del are dominant to B^+, Del^+

(R vs. r, T vs. t in previous report)

* Used for ease of comparison

** Crossed green fruited species (*L. hirsutum*) in Peru with *L. esculentum*.

与により, lycopene 生成系から δ -carotene および α -carotene への変換が行なわれる。また JENKINS ら⁸⁾ によって見いだされた Apricot strain は $r^+r^+t^+t^+at$ で表わされ, at 遺伝子は lycopene 生成量に影響を与えるが β -carotene の生成に関与しない。

MACKINNEY ら⁹⁾¹⁰⁾ は典型的な遺伝子型をもつトマト strains とそれらの交配雑種のカロチノイド組成について広範な試験を行ない, 分離とその確認のための検定をくりかえし, 各 strain 間の double recessive の分離系を得てそれらのカロチノイド組成を調べた。トマトのカロチノイドの生成過程や生成量の範ちゅうを知るためには遺伝子型が double recessive になったときの状態のものカロチノイドを分析し, その組成を確かめることにより, 各遺伝因子の機能を見極めることが必要であり, その意味合いから, MACKINNEY らの試験によって, トマトのカロチノイドの生成に関与する遺伝因子の機能はかなり明らかにされてきた¹²⁾。

本邦においても, ぞくにビタミントマトあるいはカロチントマトとして β -carotene の含量の多いトマトが取り扱われ, いろいろと育成が試みられたが, 実際にはいまだそのカロチノイド組成量については十分把握されていない。またその系統についても不詳の点が多い。著者はトマトの strain レベルにおけるカロチノイド研究の一環として, β -carotene の含有量の多い Beta orange strain を Red strain に導入した場合のカロチノイド生成量の変化および色調面について遺伝的に検討を行なった。トマトに β -carotene の含有量が多くなることは栄養的には望ましいが色調の上からは必然的に橙色へ傾き, 赤い色調に対する習慣的な嗜好性からは一考を要する。しかし本邦では, Red strain においても表果皮の色の有無から, いわゆるレッドトマトおよびピンクトマトの2系統があって, 前者は主に工業用に, 後者は生食用に利用されている現状である。

そこで本報告ではそれらに適応する品種をつくり出すための基礎的な資料を得る意味で, レッドおよびピンクの2系統品種に Beta orange strain を交配して試験を行なった。Table 2 に各 strain についての概要を示したが, 各 strain を比較する場合には便宜的に Yellow: r , Tangerine: t , Apricot: at , Beta orange: B および Delta: Del のそれぞれ記号を用いる¹¹⁾。

実験方法

試料

Beta orange strain の種子は, 米国・カリフォルニ

ア州・パークレイ・カリフォルニア大学, 遺伝実験園場¹²⁾で1970年10月下旬採取したものを親系として, 1971年3月下旬藤沢市長後, 坂田種苗KK・長後試験場において播種し, 在来種の慣行に従って管理し, その間 Red strain のうちまず表果皮に橙色の色素をもつ (colored skin) レッドトマト: マーグローブ系品種と人工交配を行ない4組の交配のうち2組の結実を得た。ついで Red strain のうち表果皮にほとんど色をもたない (colorless skin) ピンクトマト; ジェンピンク品種と人工交配させ, 1組の結実を得た。ここで本実験に用いた Beta orange strain の表果皮は橙色のものが用いられた。

マーグローブ品種を親系としたものよりの F_1 は1972年3月~8月, 上記結実種子のなかから数粒を任意にとり, これを藤沢市亀井野, 日大・藤沢実験園場において生育させ, その間人工自家交配を行ない, いずれも結実させた。

園場はスチール製の枠でつくられたビニールハウスで, 本実験中のうち5月~8月の間は被いのビニールを取り除き, 周囲に高さ2mの網を張り栽培管理した。施肥, 薬剤散布などは在来のトマトと同様方法に従って行なった。また F_1 と同時に比較試験として同じ園場に Beta orange strain, Red strain の親系各5株を F_1 と平行して生育させて, トマトの色調の比較, カロチノイドの分析などに供した。

またジェンピンク品種を親系としたものについては1971年8月~1972年3月の間前記坂田種苗KKのビニールハウスで生育結実させて F_1 を得た。ついでその F_1 のなかから測色色差分析に用いる一部の株 (F_2 に当たる) を colorless skin のものを確認した上で日大・藤沢実験園場で上記同様に生育結実させた。なお colorless skin と colored skin の間の F_1 は, 固定系ではないが colored skin をもつ。

サンプル果の採取

成熟果の判定の方法については, まず開花時にラベルを付し, 65日目を採取日と定めた。しかし成熟そのものは天候などによっての影響で数日の変動を生ずるので, 経験による着色の色合いから成熟を判断する方法も併用して過熟果をさけ, しかも十分熟したものを同一株につき少なくとも3果を採取し, 採取後48時間以内にカロチノイドの抽出を行なった。

カロチノイドの抽出およびカラムクロマトグラフィーカロチノイドの分析については MACKINNEY, G. らがトマトの分析に用いた方法⁹⁾¹²⁾ によった。すなわち, ま

Table 3. Fractions of tomato carotenoids by column chromatography

(MgO:SiO₂, 1:2.5; 2 cm ϕ × 10 cm)

zone No.	zone color	solvent	elution order	absorption maxima in petroleum ether (nm)			shift of wave length by iodine catalysis (nm)			cis-peak (nm)	probable identity
1	colorless	pure-p.e	1	295	285	276	293	283	274	obscure	phytoene
2	colorless (fluorescence)	crude-p.e	2	368	348	332	366	345	330	obscure	phytofluene
3	light-yellow	crude-p.e	3	478	445	420	475	443	418	334	α -carotene *
4	orange	2% acetone p.e	4	480	450	425	478	447	423	336	β -carotene
5	dull-yellow	5% acetone-p.e	5	425	401	380	423	398	377	obscure	ζ -carotene**
6	pinkish-orange	10% acetone-p.e	6	469	438	408	467	435	406	328	neurosporene**
7	pinkish	15% acetone-p.e	7	490	459	434	487	457	432	345	γ -carotene
8	red	benzene	9	501	474	443	498	471	440	357	lycopene
9	yellowish (two or three minor bands)	methyl alcohol	8	485	452	446	482	451	443	419	xanthophylls

p.e: petroleum ether SiO₂=Hyflo-supercel * not found, ** not detected or slightly detected

ずはじめにトマトの皮をとりその 10~20 g をアセトン 300 ml でミキサーを用いて抽出する。phytoene の分析を含む場合はエマルジョン化をさせるために、アセトンの代りに 10% ジエチルエーテルを含むメチルアルコールで抽出を行なう。抽出液はブフナーろ斗で吸引ろ過し、完全に残渣が無色になるまで 3~4 回抽出およびろ過をくりかえす。ついで分液ろ斗に石油エーテル 150ml をとり、これに前記抽出液を少量ずつ注ぎ、振とうしないで横に倒しながら静かに色素を石油エーテルに移行し、水 150~200 ml を 2~3 回に分けてゆっくり注ぎ、クロロフィルを含むアセトンを十分洗い、ついで三角フラスコに色素液をとり、無水硫酸ナトリウムを 20~30 g 入れて脱水した後、真空エバポレーターで 40°C 以下に保温しながら乾燥し、これを 25~30 ml の石油エーテルに溶かして試料液とした。

カラムクロマトグラフィーでは、Table 3 に示す充填剤を乾式法で詰め、同じく Table 3 に示すような展開剤を用いて分離溶出した。精製石油エーテルは市販品 (b.p 40~60°C) 約 1 l を活性アルミナカラム (1 cm ϕ × 1 m) を徐徐に通しはじめの滴下液約 10 ml を除いたものを用いた。分離帯の不明確な場合は、細いカラム管 (0.5 cm ϕ × 30 cm) で充填剤の分離能をかせ (酸化マグネシウム:ハイフロースーパーセルの場合、1:1 の重量割合)、再クロマトグラフィーを行ないゆるやかに分離展開した。キサントフィルズについては Table 3 に示すようにベンゼン溶出の前にメチルアルコールで一括溶出して定量に供した。

Table 4. The value of absorption coefficients used for calculation

(in petroleum ether)

carotenoid	absorption ^(13,18) coefficient (1/g. cm)	wave length (nm)
phytoene	85	285
phytofluene	140	345*
α -carotene	250	445
β -carotene	250	450
ζ -carotene	200	400
neurosporene	250	435
γ -carotene	270	460
lycopene	300	501**
xanthophylls	250	446

* Phytofluene in red strains frequently gives two zones on chromatography (an all-trans & mono-cis isomers). The figure 140 is a compromise between the two.

** peak I of all trans form lycopene.

分離された各フラクションは真空エバポレーターでいったん乾燥した後、石油エーテルに溶かし光電分光光度計で吸収曲線を調べ、それぞれのカロチノイドのもつ特有の極大吸収波長を照合して同定した。この場合、カラムクロマトグラフィー上の吸着位置や吸着帯の色、あるいは紫外線鑑識 (3650 Å) による蛍光など経験的な判別方法を併用した。

カロチノイド含有量の計算には Table 4 に示す吸光係数^(13,18)を用い、次式を使って成熟果中の $\mu\text{g/g}$ として算出した。

$$C_{\mu g/g} = \frac{A}{K} \times \frac{\text{Vol. l}}{\text{Wt. g}} \times (D) \times 10^6$$

C=Concentration in fresh fruit

A=Optical density at appropriate wave length

K=Absorption coefficient

D=Dilutions made for absorbance determination

Vol.=Solvent volume dissolved

Wt.=Weight of fresh fruit

ヨードによるカロチノイドの接触異性化について

各カロチノイドの同定に当って、その補助のためヨードによる接触反応を行なった。すなわち、分離して石油エーテルに溶かした各フラクションを 10 ml 容メスフラスコ 2 個に 2 ml ずつとり、その一方に 0.001% ヨードメチルアルコールをガラス毛细管を用いて一滴 (約 0.03~0.05 ml 程度) を滴下した後両方のメスフラスコを石油エーテルで定容として、螢光橙に等距離に近づけて約 2 分間振とうした後直ちに両者の極大吸収を測定する。溶液中のカロチノイドの大部分に異性化が生じ、新しく混合平衡状態に達すると極大波長が異動する。ヨードを滴下しない方も異性化は起るがそれは微弱であり、ヨードを滴下したものと比べ相対的に差を生ずる。この方法によれば全トランス体カロチノイドはほとんどモノシス体への立体異性化により普通 2~4 nm 短波長側へのシフトが起る。ポリシス体では逆に長波長側へシフトする。またシスピークは当該カロチノイドの最長波

長の極大吸収から 142 ± 2 nm 短波長側に出現するが全トランス体にはほとんど出現しない⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。これらのことから分離した各フラクションが単一物が混合物かの判別を行ない、必要に応じて前記のようなカラムを用いて再クロマトグラフィーを行なった。

カラムクロマトグラフィーにおける β -carotene および lycopene の回収試験について

市販 β -carotene (メルク製) を用い 0.00001% アセトン溶液を調製し、この 100 ml を同容量の石油エーテルに移行し、いったん真空エバポレーターで乾燥した後再び石油エーテルに溶解してその全量を正確に 50 ml とし、450 nm におけるこの吸光度を計り、ついで前記の通りカラムクロマトグラフィーを行ない回収率を求めた。またこれと同様方法でトマトより抽出し結晶化した lycopene を単独に、ついで同様方法で調製した β -carotene と lycopene の等量混合液を用いて回収率を求めた。

以上の方法で各 3 回行なった結果の回収率として、 β -carotene 単独の場合は $98.9 \pm 0.6\%$, lycopene 単独の場合 $95.1 \pm 2.9\%$ であり、また β -carotene, lycopene 混合液からのフラクション溶出の場合、 β -carotene $98.2 \pm 1.0\%$, lycopene $93.4 \pm 3.1\%$ であった。これによると β -carotene はいずれの場合も回収率は良好であったが lycopene は β -carotene に比べてかなり低かった。

Fig. 1. Absorption curves of extract and sum of fractions
Solvent volume dissolved for absorbance determination:
200ml, respectively. Weight of original fruit: 20g

実際のトマトカロチノイドの分析においては Fig. 1~3 に示すような結果を得た。各カロチノイドフラクションの溶出液を加算したものから、それらの極大吸収波長における減少率をみると、Red strain では 470 nm において 96.4%, Beta orange strain では 450 nm において、97.3%, またそれらの F₁ では 465 nm において 96.5% であった。

表果皮・果肉および果実の測色色差分析について

表果皮はカロチノイド系色素以外の色素をもつがこの色が果実の色調にどのように影響を与えるかについて測色色差分析⁽¹⁶⁾を試みた。各 strain およびそれらの雑種について各果の各部位の 3 カ所ずつを測定してその平均値を示した。すなわち表果皮については成熟果の皮をむきとり、水洗して付着している果肉をとっ

Fig. 2. Absorption curves of extract and sum of fractions
Solvent volume dissolved for absorbance determination:
200ml, respectively. Weight of original fruit: 20g

Fig. 3. Absorption curves of extract and sum of fractions
γ-carotene is minor contributors, ca., 0.01 at the maxima.
Solvent volume dissolved for absorbance determination:
200ml, respectively. Weight of original fruit: 20g

た上でアセトンでカロチノイドを完全に溶出した後、風乾して用いた。果肉は表果皮を除いた肉質部分4~6mmの厚さのところを切断し、果実のものと外側の方からこれを測定できるようにセットした。果実(果肉+表果皮)

については供試サンプル果実の外観上平均的な色相部分を選び表果皮をつけたまま果肉を切断し、果実部分のときと同じくもとの外側からこれを測定できるようにセットした。

これらは東京電色 TC-D 65 型測色色差分析計を用い、あらかじめ標準白を測定しておきこれをもとにし、表果皮は皺や縮みができないように伸ばして上を黒色のキャップで覆い、また果肉、果実は 30 cm φ×1.3 cm の同機備えつけの円型ガラスセルに入れて黒色のキャップで覆い測定した。

この方法は HUNTER, R. S. により考案された L, aL および bL 方式を採用したものであるが、ここで aL, bL は色度(色相または彩度)を示し aL が+側で数値が大であれば赤色が強くなる, bL が+側で数値が大であれば黄色が強くなる。また L は明度を表わし, L の値が 100 に接近すると白色が強くなる。

Table 6 には測色色差分析の結果を示したが、測色色差分析に供試した果肉部分の lycopene および β-carotene の含有量を前記同様方法で分析し、各3サンプルについてそれらの平均値として併記した。

結果および考察

Red strain 3 株, Beta orange strain 3 株およびそれらの F₁ 3 株のトマトのカロチノイドの分析の結果を Table 5 に示す。肉眼による観察では、F₁ 果はすべて橙赤色系統の色調をもつ。しかしターニングからピンクステージにおいて、橙色の表果皮をもつ Red strain の場合、外観的には橙赤色を呈して F₁ の橙赤色果とは一見区別しにくい、成熟が進み表果皮を容易に剥ぐことができる段階では、表果皮をとって果肉を直接比

較するなどにより、F₁ の成熟果と Red strain の赤色果の識別は、かなり経験を要するが可能である。

また F₁ 完熟果で lycopene と β-carotene をほぼ同量程度含有する場合に、橙色の表果皮をもつ果実の外観

Table 6. Carotenoid contents and color and color-difference of tomato strains and hybrids

Strain & hybrid	Phenotype (fruit characteristics)		Carotenoid content ($\mu\text{g/g}$)		Color and color-difference*					
					flesh		skin		fruit	
	skin	fruits coloring	lycopene	β -carotene	L	aL	L	aL	L	bL
Red strain	colored skin	deep red	65.8	3.9	+34.1	+52.9	+35.6	+10.7	+40.9	+59.2
	colorless skin	pinkish red	63.0	4.2	+35.8	+57.2	+39.2	+3.4	+57.2	+54.9
Beta orange strain	colored skin	orange	1.2	58.7	+45.8	+43.6	+36.6	+12.5	+51.3	+47.2
	colored skin**	deep orange-red	21.1	23.0	+40.3	+46.4	+33.3	+15.2	+43.3	+59.3
Red $\times$ Beta orange: hybrid	colorless skin***	pale reddish (pinkish) orange	20.8	24.9	+41.0	+45.8	+38.4	+3.6	+59.0	+49.1

* Standard white: L+91.40, aL -0.40, bL +3.58. (TC-D 65 type, P.S. Hunter)

Result of measuring: ave. of three sample fruits, respectively

L: lightness aL, bL: chromaticity

** Samples of Red (colored skin) $\times$ Beta orange (colored skin): F₁*** Samples selected in Red (colorless skin) $\times$ Beta orange (colored skin): F₂

は濃橙赤色を呈して、Red strain の赤色果に近い色調をもつに至る。しかしこれと対照的にほとんど色をもたず、半透視性でかすかにピンク色を帯びる表果皮のときは、外観的な色調は“色ののり”が不均一で薄いピンク色を帯びる橙色を呈する。

F₁ における遺伝形質とその裏付けとなるカロチノイド含有量との関係は次のように考察される。すなわち Beta orange strain $r^+r^+B^+B^+$ に対応する Red strain においては、 β -carotene の生成に関与する B 遺伝子が欠失しているとして $r^+r^+B^+B^+$ の遺伝子型をとるので、この両者間の F₁ は両親系の形質を受け継ぎ、 $r^+r^+B^+B^+$ の heterozygous になって、lycopene 生成量は Red strain のもっている 50~70 $\mu\text{g/g}$ から 15~30 $\mu\text{g/g}$ に減って、その減少にほぼ見合う 25 $\mu\text{g/g}$ 前後の β -carotene を生成する。そこで暗赤色をもつ lycopene と黄橙色をもつ β -carotene が混成主体となって果肉は概して橙赤色を呈する。

また γ -carotene は開環型から閉環型カロチノイドへの環化中間体として生成されるが、生成と同時にほとんど β -carotene に変換されるので、不完全な環化体として生成残留した γ -carotene が微量検出されるものと解される。

測色色差分析においては表果皮の有色のものとの色をほとんどもたないものの違いは、果実の色調に相当の影響を与えることが指摘される。しかし果肉と果実および表果皮との呈色上の相関関係を測色色差分析からみた場合には、有色の表果皮(橙色)をもつ果実が濃橙赤色を呈することは察知し得るが、カロチノイド含有量との相関関係を説明するには、他の呈色要素も加わって測定値幅の広がりが大きく、なお検討が必要である。

MACKINNEY, G.¹⁰⁾ は多数の試験の結果、 r 遺伝子が r^+ である場合の β -carotene の含量について、BB: 70~90, B^+B^+ : 40~50 および B^+B^+ : 5~10 $\mu\text{g/g}$ と報告している。lycopene 含量については報告¹²⁾を集約すると $r^+r^+B^+B^+$ では 20~40 $\mu\text{g/g}$ としてかなり幅をもっているが、それらのサンプルはすべて橙色の表果皮をもつため、lycopene および β -carotene 含量の多少の違いはあっても外観は比較的均一な色調をもち濃橙赤色を呈する。

以上のことから Red strain に Beta orange strain を導入した場合、lycopene 生成系の一部を β -carotene に変換するが、その生成量は r 遺伝子によって lycopene 生成総量をあらかじめ制約され、その範囲内において B 遺伝子は機能を現わすものと考えられる。

Table 5. Carotenoid analysis

Red strain (parental)

($\mu\text{g/g}$ fresh fruit)

plant No.	flesh color	phytofluene	β -carotene	γ -carotene	lycopene	xanthophylls	Total
201	red	4.3	3.4	0.1	59.1	3.3	70.2
202	red	5.2	4.4	0.9	72.2	2.9	85.6
203	red	2.9	5.7	0.7	64.8	4.7	78.8
av.		4.1 $\pm$ 1.1	4.5 $\pm$ 1.2	0.6 $\pm$ 0.3	65.4 $\pm$ 6.8	3.6 $\pm$ 1.1	78.2 $\pm$ 7.4

Beta orange strain (parental)

plant No.	flesh color	phytofluene	β -carotene	γ -carotene	lycopene	xanthophylls	Total
501	orange	1.3	62.8	1.4	1.8	6.3	73.6
502	orange	0.9	51.2	2.7	0.9	8.2	63.9
503	orange	1.0	48.9	2.1	1.0	4.1	57.1
av.		1.1 $\pm$ 0.2	54.3 $\pm$ 8.5	2.1 $\pm$ 0.6	1.2 $\pm$ 0.6	6.2 $\pm$ 2.0	64.9 $\pm$ 8.7

Red strain $\times$ Beta orange strain; F_1

plant No.	flesh color	phytofluene	β -carotene	γ -carotene	lycopene	xanthophylls	Total
251	orange-red	2.4	26.6	1.1	17.4	4.3	51.8
252	orange-red	1.7	19.3	0.9	29.8	7.1	58.8
253	orange-red	2.5	28.8	1.0	22.3	2.9	57.5
av.		2.2 $\pm$ 0.3	24.9 $\pm$ 3.9	1.0 $\pm$ 0.1	23.2 $\pm$ 6.6	4.8 $\pm$ 2.3	56.0 $\pm$ 2.8

またカロチノイド生成も環境、なかんずく温度の影響を受けてその発現量を異にするが、これら温度差による違いについて、lycopene および β -carotene など個々のカロチノイドの生成変化を strain のレベルで試験する必要があるものと考える。

要 約

トマトの系統種のうち Beta orange strain を Red strain に導入し、その F_1 雑種の色調およびカロチノイド組成量について検討した。 F_1 雑種においてはカロチノイド生成に関する B 遺伝子は B^+B の heterozygous になって lycopene 生成系に対して、これをブロックして β -carotene に変換する。以下本実験結果について次の要約が得られた。

(1) F_1 雑種では lycopene は Red strain の 50~70 $\mu\text{g/g}$ から 15~30 $\mu\text{g/g}$ に減少され、 β -carotene は 25 $\mu\text{g/g}$ 前後生成されて、その含有量は Red strain の β -carotene 量の数倍に達した。

(2) F_1 雑種の γ -carotene 含有量は Red strain より多く、Beta orange strain よりは少なかった。しかしその増減差は 0.5~2.5 $\mu\text{g/g}$ 程度で僅少であった。

(3) F_1 雑種の成熟果の果肉は概して橙赤色を呈するが表果皮の色の影響を受けて果実の色差は広範にわたる。個々の色調については、測色色差分析とも傾向的には一致するが、表果皮がほとんど色をもたないときは果実全体からみて色調が不均一で薄いピンク色を帯びる橙赤色を呈し、また表果皮が橙赤色をもつときは果実は濃橙赤色をもち比較的均一な色調を呈した。

本試験に当たり多大の御協力を賜りました坂田種苗 KK・長後試験場長秋谷良三博士並びにトマト育種部に感謝いたします。

また貴重なトマト strains の分与をいただき、御指導下さいましたカリフォルニア州立大学名誉教授 MACKINNEY, G. 博士に謝意を表します。

また本研究について終始御指導いただき、本論文の御校閲を賜りました東京農業大学教授小原哲二郎博士に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) McARTHUR, J. W.: *J. of Genetics*, 29, 123 (1934).
- 2) YOUNG, P. A. and MACARTHUR, J. W.: *Horticultural characters of Tomatoes, Texas Agri-*

- cultural Experiment Station Bulletin*, No. 698, 33 Nov. (1947).
- 3) LERSEN, A. L., WENT, F. W., and ZECHMEISTER, L.: *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **27**, 236 (1941).
 - 4) ZECHMEISTER, L., LERSEN, A. L., WENT, F. W., and PAULING, L.: *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **27**, 468 (1941).
 - 5) ZECHMEISTER, L., and LERSEN, A. L.: *J.A.C.S.*, **64**, 1075 (1942).
 - 6) LINCOLN, R. E., and PORTER, J. W., *Genetics*, **35**, 206 (1950).
 - 7) GOODWIN, T. W., and WILLIAMS, R. J. H.: *Biochem. J.*, **94**, 5c, (1965).
 - 8) JENKINS, J. A., and MACKINNEY, G.: *Genetics*, **38**, 2, 107 (1953).
 - 9) MACKINNEY, G. and JENKINS, J. A.: *Genetics*, **35**, 284 (1949).
 - 10) MACKINNEY, G.: *Estratto da Genetic a Agraria* 345 (1956).
 - 11) MACKINNEY, G.: *Inheritance of Carotenoid Differences In the Tomato*. *Qualitas plantarum et Materiae Vegetables Volumen, III/IV, Separatum 25—IV*, 251 (1955).
 - 12) MACKINNEY, G., et al.: *Summary of 1970 Field Planting Tomatoes of Oxford Tract*, Berkeley, Univ. of Calif. Dec. (1970) (unpublished).
 - 13) GOODWIN, T. W.: *Carotenoids, in Modern Methods of Plant Analysis*, Vol. III, 272 Springer-Verlag, Berlin. (1955).
 - 14) 広田才之: 日大・農獣医・研究紀要, 第8号, 23 (1971).
 - 15) 広田才之: 日大・農獣医・学術研究報告, 第31号, 93 (1973).
 - 16) 佐藤 寿ほか: 物理化学 機器分析の基礎と実験, コロナ社, 283 (1973).
- (昭和49年10月16日受理)