

## トマトの色の違いから食味に迫る ～色素の種類と蓄積量が甘味と香りを左右する～

トマトの果実の食味は、甘味としての糖や酸味としての有機酸に加え、種々の香気成分によって形作られます。例えば、果実の赤色や黄色を構成する色素のカロテノイドが分解されて発生する香気成分のアポカロテノイドは、甘味の知覚を強めるとされています。しかし、さまざまな色を持つトマト品種において、その色の違いが食味に与える影響は明らかにされていませんでした。

本研究ではまず、多種多様なトマト品種の果実に含まれる色素のうち、緑色色素で光合成に重要なクロロフィルとカロテノイドを簡便で迅速に定量する技術を開発しました。更に、この技術を用いて得た色素の定量データと糖類および香気成分含量データとを統合解析し、トマトの果実の色と食味の関係性を明らかにしました。

157品種の成熟したトマト果実を調べた結果、クロロフィル含量上位10%品種は、果実中の主要な糖類であるグルコースとフルクトースの含有量が下位10%品種に比べて有意に高いことが分かりました。これは、果実中のクロロフィルが何らかの形で果実中の糖蓄積に寄与する可能性があることを示しています。また、アポカロテノイド香気成分の一つである6-メチル-5-ヘプテン-2-オン(MHO)の含有量が高い2品種では、その前駆体でカロテノイドの一種であるリコペンがほとんど存在しないことが分かりました。更なる解析で、これらの品種にはリコペンの代わりにプロリコペンという別のカロテノイドが存在し、これがMHOの前駆体として機能している可能性が示唆されました。

これらの成果は、未解明な点が多いトマト果実中の食味に関わる化合物の代謝制御メカニズムの理解に貢献すると考えられます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系

草野 都 教授

## 研究の背景

トマト果実の食味には、グルコースやフルクトースなどの糖類、クエン酸などの有機酸に加え、さまざまな種類の香気成分が重要な役割を担います。特にアポカロテノイド香気成分は、トマト果実の甘味を強める効果があることが明らかになっています。この香気成分は、果実の赤色や黄色を構成する色素であるカロテノイド<sup>注1)</sup>が分解されて発生します。また、果実の成熟とともにカロテノイドが増加するのに合わせて、アポカロテノイド香気成分の含量も上昇していくことが知られています。加えて先述した糖や有機酸の含量も、果実の成熟過程におけるクロロフィル<sup>注2)</sup>の分解やカロテノイドの合成といった果実色の变化に協調して変化します。更に、果実中の糖の一部は、光合成により果実中で合成される可能性が指摘されています。しかし、これまで果実に含まれる色素組成の品種間差と食味との関係は明らかになっていませんでした。そこで本研究では、果実中の色素含有量と食味を構成する化合物群の双方に着目し、その関係性を解析しました。

## 研究内容と成果

定量性を担保しつつ大規模分析を達成するため、本研究ではまずクロロフィルとカロテノイドを簡便かつ迅速に定量する方法を開発しました。本手法は、マイクロプレートリーダー<sup>注3)</sup>を用いて色素抽出物の吸光度を測定することにより、クロロフィル a および b の含有量、カロテノイド総量、リコペン含有量を同時に定量できます。代表的な既存手法である HPLC<sup>注4)</sup>と比べると、検出下限値は同程度を保ちつつ、測定時間を従来の数十分から数十秒と大幅に短縮できたため、多品種の分析に向いています。本手法を用い、研究材料として代表的な品種である'Ailsa Craig'、'Moneymaker'および'Micro-Tom'を分析し、赤色果実を持つ代表的な品種の果実成熟過程における色素含有量の変化を調べました。その結果、緑、黄、赤色果実の、果実色に対応した色素含有量の差を捉えることができました。

次に、この手法を用いて、157 品種の成熟したトマト果実中のクロロフィルとカロテノイドの含有量を測定しました。157 品種中 142 品種は赤色果実を持つ品種であり、'Ailsa Craig'、'Moneymaker'および'Micro-Tom'成熟果実と同様に、カロテノイド総量に占めるリコペンの割合が 50%-60%前後であり、赤熟果実においてこの比率が広く保存されていることが示唆されました。

この色素分析結果に、過去に実施された 157 品種の糖と香気成分の分析結果を組み合わせることで、果実中の色素と食味との関係について統合解析を行いました。その結果、クロロフィル a 含量の上位 10% 品種は、グルコースおよびフルクトースの含量の平均値が、下位 10% 品種よりも有意に高いことが分かりました。

更に、アポカロテノイド香気成分の一つで甘い香りを呈する 6-メチル-5-ヘプテン-2-オン (MHO) について、平均値の 5 倍という突出した含有量を示す 2 品種が見つかりました。ところがそれらの品種では、前駆体であるリコペンの含量は非常に低く、含有量下位 10% 群に属していました。しかし、カロテノイド総量は他の品種と比較して変わらなかったことから、何らかのカロテノイドが蓄積していることが認められました。この品種の果実中に含まれるカロテノイドを同定するため、HPLC によるカロテノイドプロファイリングを行い、他の赤・茶・黄色果実品種のカロテノイドおよびクロロフィル含有量と詳細に比較しました。その結果、MHO 高蓄積品種の一つである'Dixie Golden Giant'の果実中には、リコペンの異性体であるプロリコペン(テトラ-シス-リコペン)と推定されるカロテノイドのみの蓄積が認められ、この化合物が'Dixie Golden Giant'果実中で MHO を生産する唯一の材料である可能性が示唆されました。このカロテノイドは、HPLC で分析した他の品種の果実中には見られず、この品種に見られた非常に高い MHO 含量は、このプロリコペンがリコペンよりも効率的に MHO に変換されることにより生じていると考えられます。

## 今後の展開

本研究チームは、果実のクロロフィルおよびカロテノイドの含量と食味との関連性およびそのメカニズムの解明に向け、更に研究を進めています。今後は、本研究で得たクロロフィルとカロテノイドの含有量を元に、クロロフィルやカロテノイドの含有量制御に関わる遺伝子の探索と機能解析を進め、その遺伝子が色素や糖含量、香り成分含量にどう影響を与えていくのか、その解明を目指します。得られた成果はトマトの品種改良における重要な知見となり、更なる品種開発や品質向上につながると考えられます。

## 参考図

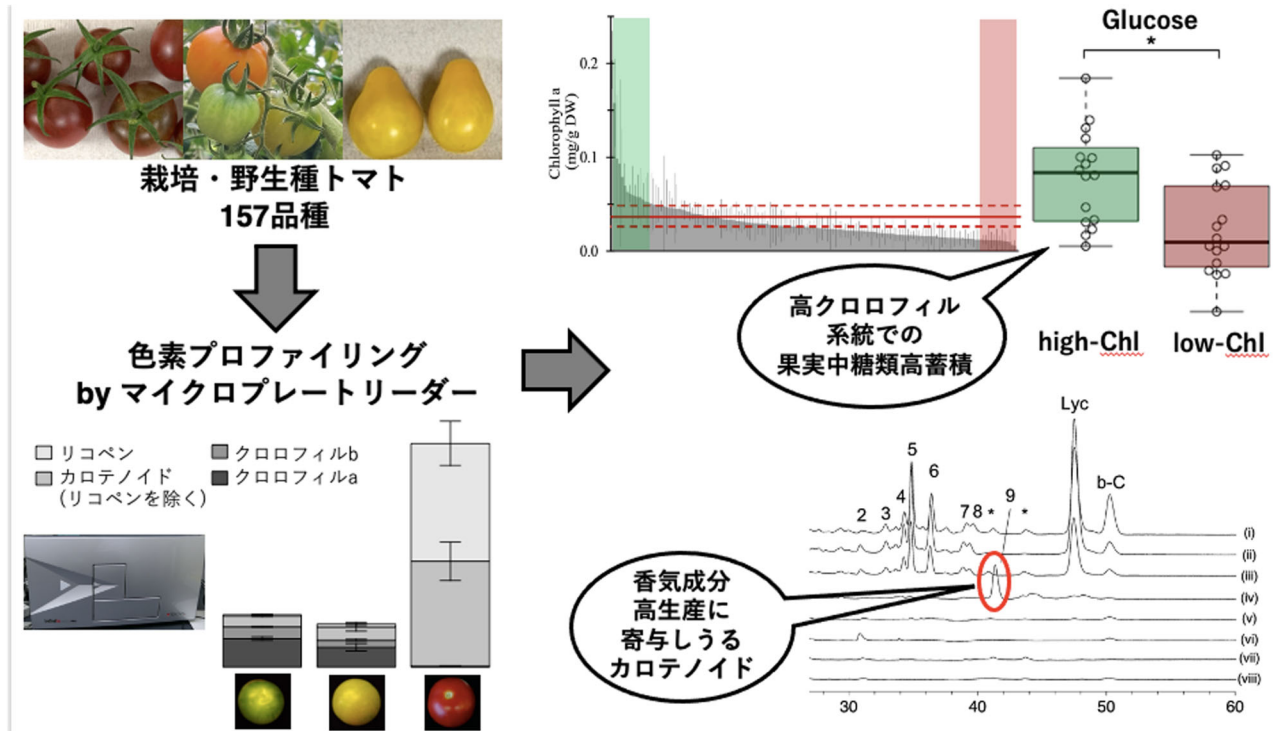


図 本研究の流れと結果

栽培・野生種トマト 157 品種のクロロフィルとカロテノイドの含有量を測定し、糖類と香り成分含有量の分析データとの統合解析を行った。その結果、高いクロロフィル含有量を示す系統で糖類（グルコースとフルクトース）の含有量が高いことが示された。加えて、アポカロテノイド香り成分を多量に蓄積する系統の果実特異的に蓄積するカロテノイドが見出された。

## 用語解説

- 注1) カロテノイド 微生物、動物、植物等に広く存在する赤黄色色素。植物体中では光合成を助ける働きがある。強い抗酸化作用が認められるなど人体にとっても重要な栄養素の一つである。
- 注2) クロロフィル 葉緑素とも呼ばれる。植物の生存に必須な色素の一つであり、緑色を呈する。光合成において光エネルギーを捕捉する役割を担う。
- 注3) マイクロプレートリーダー マイクロプレートと呼ばれる実験器具の各くぼみ（ウェル）にサンプルを注入し、サンプルの吸光度や蛍光度を測定する分析機器。
- 注4) HPLC 高速液体クロマトグラフィー（High Performance Liquid Chromatography）の略。液体試料中の多成分を分離分析する手法。本研究ではフォトダイオードアレイ検出器によって対象化合物を検出した。

## 研究資金

本研究は、平成 28 年度国立大学法人運営費交付事業「フードセキュリティー実現のための循環型研究拠点の構築」、平成 30 年度一般社団法人ヤンマー資源循環支援機構、科学研究費助成事業基盤研究 (C) (19K05711)、アメリカ国立科学財団 (IOS 1855585) による助成のもと実施されました。

## 掲載論文

**【題 名】** High-Throughput Chlorophyll and Carotenoid Profiling Reveals Positive Associations with Sugar and Apocarotenoid Volatile Content in Fruits of Tomato Varieties in Modern and Wild Accessions.

(クロロフィルおよびカロテノイドのハイスループットプロファイリングが現代・野生品種トマト果実中の糖類およびアポカロテノイド香気成分含量と正の寄与を明らかにする)

**【著者名】** Yusuke Aono<sup>1</sup>, Yonathan Asikin<sup>2</sup>, Ning Wang<sup>1</sup>, Denise Tieman<sup>3</sup>, Harry Klee<sup>3</sup>, Miyako Kusano<sup>1,4</sup>

1)筑波大学 2)琉球大学 3)フロリダ大学 4)理化学研究所環境資源科学研究センター

**【掲載誌】** Metabolites

**【掲載日】** 2021 年 6 月 18 日

**【DOI】** <https://doi.org/10.3390/metabo11060398>

## 問合わせ先

**【研究に関すること】**

草野 都 (くさの みやこ)

筑波大学生命環境系 教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003575>

**【取材・報道に関すること】**

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)