

世界一のリンゴ「ふじ」の特性解析

日本発のリンゴ「ふじ」は2001年に生産量世界一と認定された。アメリカ産品種「国光」と「デリシャス」の交配（1939年）¹⁾から60年以上を経て達成した快挙であった。甘い風味とジューシーで硬い食感、日持ちの良さが魅力の「ふじ」は、当時のブリーダーの感覚（味覚、嗅覚、触覚）と勘を頼りに選抜された。その優れた形質の本質と制御機構は、分析化学の進歩とともに徐々に明かされ、次世代品種の育種に活かされている。本稿ではその一端を紹介したい。

1 風味の解析-みつ入りと関連して

「ふじ」は「デリシャス」の甘い風味とみつが入りやすい形質を受け継いでいる。国内では、みつ入り果の風味の良さが「ふじ」の価値を高めているともいえる。その人気の高さはリンゴの成分分析（プロファイリング）と官能評価の統合解析から明らかになった²⁾。客観的な官能評価（定量的記述法：QDA）により糖度に差がない「ふじ」のみつ入り果とみつなし果の風味を解析すると、鼻先で嗅いだニオイではみつ入り果が甘くフルーティだが、鼻をつまんで食べると甘さや呈味に有意差は認められなかった。みつ入りリンゴの香気成分が甘い風味を強化しているものと推定される。一方、GC-MSを用いた香気・呈味成分プロファイリングでは、みつ入り果に共通してエチルエステル類の含有量が顕著に高かった。エチルエステル類は嗅覚の閾値が小さくフルーティスイートな香気特性を持つことから、みつ入りリンゴの風味に影響していることが想定された。

リンゴにエタノール蒸気を吸収させると容易に組織内の脂肪酸とエチルエステルを生成する。これを利用して、みつ無し「ふじ」に対してエタノールをベースとするアルコール混合物を数種類吸収させ、香気成分（特にエステル類）の組成に幅のある「ふじ」を作成し、QDAに供した。その結果、エチルエステル類の濃度と官能評価における甘い香りの強さには正の相関が認められた（図1）。また、男女70人に好みを問う消費者テストでも、エチルエステル濃度の高いサンプルの評価が高かった。みつ入りリンゴの嗜好性の鍵にはエチルエステル類の甘い風味が関与していることが明らかとなった²⁾³⁾。

「ふじ」の父「デリシャス」はみつ入り特性を持つ古い品種だが、貯蔵中の軟化が速く、みつ入り部分が褐変することで知られている。これを受けて、みつ入り品種はおしなべて軟化・褐変を起こしやすいというイメージ

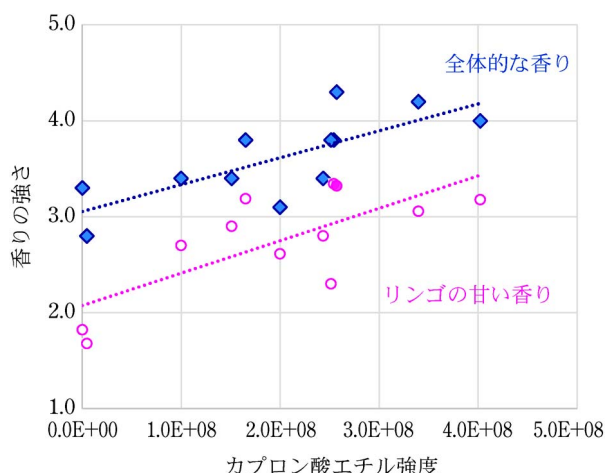


図1 リンゴのエチルエステル発生量（カプロン酸エチル強度）と香りの強さ³⁾

トレーニングされたパネル10名のニオイかぎによる客観的評価。炭素数3~6の脂肪酸エチルエステル類のピーク面積は互いに相関が高く、他のエチルエステルも同様の関係がみられる。

が定着し、欧米では現在もみつ入りを避ける早期収穫が推奨されている。しかし、国内の複数の研究機関でリンゴ品種のみつ入りと貯蔵障害を調べた結果、「ふじ」とその孫である「あおり21」はみつ部分の褐変が少なく、「ふじ」は普通冷蔵で3~4か月、「あおり21」は半年にわたる保存も可能であった⁴⁾⁵⁾。この褐変を起こしにくいという「ふじ」の極めて画期的な特性が“芳醇な風味を呈するみつ入りリンゴ”という新たな商品価値を生み出したといえる。

現時点で、「ふじ」の褐変の生じにくさの詳細は不明であるが、過剰なみつや長期にわたる貯蔵では「ふじ」であっても障害発生のリスクはある。春先までの消費と長期貯蔵用を作り分け、適正に流通させる取り組みが行われている。

2 食感の解析

「ふじ」のもう一つの優れた特性は日持ちの良さにある。パリッとした歯切れの良さや果肉の硬さは新鮮なリンゴの魅力の一つだ。リンゴはいずれ軟化する運命にあるが、その速度は品種によって大きな差がある。「デリシャス」は軟化が速く、「国光」は当時では硬く貯蔵性のある品種であった¹⁾。

軟化過程の二つの重要な要素である粉質化と果肉細胞の膨圧の低下速度が解析された⁶⁾⁷⁾。粉質化とはリンゴが老化によりモサモサした食感になる現象である。果肉

の隣接する細胞同士の接着がゆるみ、ばらばらになることで引き起こされる。その程度はスクロース溶液中で果肉切片を振とうし、崩れずに残存した果肉の量として測定される。軟化（硬度の低下）はペネトロメーターで、細胞膨圧はサイクロメーターで計測する。

Iwanami らによる軟化速度が異なる 27 品種の解析では⁷⁾、粉質化する品種は例外なく軟化が速く、膨圧の低下速度の影響はなかった。一方、粉質化しない品種では、軟化速度は膨圧の低下速度と正の相関があった。すなわち、軟化が遅い品種の条件は①粉質化せず、②膨圧の低下速度が緩やかな品種に限られる。「ふじ」とその子孫「千秋」「きたろう」「シナノゴールド」はこの条件を満たしており、実際に長期に硬さを保てる品種である。

「デリシャス」の枝代わり品種「スターキングデリシャス」も軟化速度が速い。これは粉質化する特性を持つためであり、膨圧の減少速度は遅いことが実測により判明した。一方、「国光」は粉質化はしないが膨圧の低下速度は平均的であり、「ふじ」よりも軟化は速い。これらを総合すると、「ふじ」は硬い肉質の「国光」から粉質化しない形質を、粉質化に伴い軟化する「デリシャス」からは隠し持っていた膨圧低下速度の緩やかな形質を受け継ぎ、特徴的な硬い食感やそれを長期間維持できる優れた形質を獲得したものと考えられる。「ふじ」は長らく「みつ入りリンゴは軟化と褐変を起こしやすい」とされてきた常識を二つとも覆した、奇跡の品種とも呼ばれている。

3 家系解析

「ふじ」後代の品種・系統の染色体上には「ふじ」染色体が伝播しており、染色体領域の型（ハプロタイプ）と形質との相関を調査すれば、「ふじ」の優れた形質を制御する染色体領域を解析することができる。「ふじ」はその優れた形質から、育種親として数多く利用されており、多数の家系品種（「ふじ」とその親を祖先とする品種）が育成されている。この恵まれた材料を解析することにより、有用形質の原因染色体領域の特定が実施された⁸⁾。

次世代シーケンサーで解読した「ふじ」のゲノム配列と、「ゴールデンデリシャス」の公開配列の比較に基づいて開発した、1014 個の一塩基多型（SNP）マーカーを用いて、115 の「ふじ」家系品種・系統の遺伝子型解析を行い、これらの品種・系統に伝播した「ふじ」の染色体領域とハプロタイプを追跡した。「ふじ」の染色体は「国光」および「デリシャス」由来の染色体で構成されているから、ハプロタイプは「国光」型と「デリシャ

ス」型に区別できる。染色体領域ごとに、「国光」型を持つ品種と「デリシャス」型を持つ品種の形質を比較した結果、収穫期、酸度、みつ入り程度、粉質化程度と関連する領域が検出された。具体的には、第 14 番染色体にみつ入り程度、第 1 番染色体に粉質化と関連する領域があり、それぞれの領域が「デリシャス」型の品種はみつ入り程度または粉質化程度が高いことが明らかになった。

このようにして得た遺伝情報は、これらの形質をターゲットとした新品種のゲノム選抜に利用できる。「ふじ」は交配から 12 年後に初めて実がなったが、ゲノム選抜では結実を待つことなく幼植物のうちに選抜できるので、育種の飛躍的なスピードアップにつながる。また、「デリシャス」系に頻出するみつ入りと粉質化は独立した形質であることが家系解析からも確認できたことになる。今後、膨圧の低下速度や褐変抵抗性のような複雑な現象についても生理的なメカニズムの解明とその制御領域が明らかになることを期待する。

地域発を世界の中の日本発と解釈し、「ふじ」を例に高品質農産物を開発する過程の様々な分析について紹介した。多様な分析項目とその意義を重視したため、各分析技術の詳細を紹介できなかつた。興味を持たれた方は原著を参照していただければ幸いである。

本研究の一部は生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち先導プロ）」の支援を受けて行った。

文 献

- 1) 定盛昌助：農業技術，**27**, 419 (1972).
- 2) 田中福代，岡崎圭毅，樫村友子，大脇良成，立木美保，澤田 歩，伊藤 伝，宮澤利男：日本食品科学工学会誌，**63**, 101 (2016).
- 3) F. Tanaka, F. Hayakawa, M. Tatsuki : *Molecules*, **25**, 1114 (2020).
- 4) 葛西 智，小林 達，工藤 剛，後藤 聡：園芸学研究，**18**, 173 (2019).
- 5) 小野寺玲子，工藤 信，高橋和博，伊東良久，中村ゆり，羽山裕子：東北農業研究，**63**, 111 (2010).
- 6) H. Iwanami, S. Moriya, N. Kotoda, S. Takahashi, K. Abe. : *Hortscience*, **40**, 2091 (2005).
- 7) H. Iwanami, S. Moriya, N. Kotoda, K. Abe : *Hortscience*, **43**, 1377 (2008).
- 8) M. Kunihisa, S. Moriya, K. Abe, K. Okada, T. Haji, T. Hayashi, Y. Kawahara, R. Itoh, T. Itoh, Y. Katayose, H. Kanamori, T. Matsumoto, S. Mori, H. Sasaki, T. Matsumoto, C. Nishitani, S. Terakami, T. Yamamoto : *Breeding Science*, **66**, 499 (2016).

〔国立研究開発法人農業・食品産業技術
総合研究機構 田中福代〕