果実発達の新たなルールを発見

―機械学習と三次元解析による果実成長の可視化―

概要

西山総一郎 京都大学大学院農学研究科助教（兼：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業情報研究センター 主任研究員)、田尾龍太郎 同教授、山根久代 同教授、久住あかね 同博士課程学生、新保彩萌 同修士課程学生の研究グループは、板井章浩 京都府立大学大学院生命環境科学研究科教授、森本拓也 同准教授との共同研究により、様々な果樹における果実の三次元成長を可視化し、果実発達に共通する成長様式の存在を明らかにしました。

本研究では、果実の先端から基部にかけた部位ごとの成長を三次元的に解析することで、果実形状がどのように形成されるのかを明らかにしました。まず多様な形を持つカキを対象に、果実表面に付した指標点の移動を解析した結果、いずれの品種でもヘタ側の成長が特に活発で、先端部に向かうにつれて成長が緩やかになる共通した成長勾配が確認されました。さらに、果実の形が異なる品種間では、この成長勾配の強さに違いがあることも明らかになりました。加えて、機械学習を用いた新しい三次元再構築手法である 3D Gaussian Splatting を導入し、果実成長を非破壊的に連続観察する手法を確立しました。この手法をモモやリンゴなど複数のバラ科果樹に適用したところ、一貫して果柄側の成長が優位であるという共通性が見いだされました。一方、セイヨウナシでは先端側の成長も顕著であり、形状に関連した果樹種ごとに異なる発達様式の存在が示されました。

本研究成果は、2025 年 9 月 18 日に国際学術誌「Scientia Horticulturae」に、また 2026 年 1 月 9 日に国際学術誌「Plant Phenomics」に掲載されました。

図：（左）京都大学附属京都農場に保存されている多様な形状のカキ（写真提供：久住あかね)、
（右）3D Gaussian Splatting により 3D モデル化したバラ科果樹（写真提供：新保彩萌）

１．背景

果実の大きさや形は、果物を選ぶ際の重要な判断基準の一つです。したがって、果実発達の仕組みを理解することは、理想的なサイズと形状を目指した栽培管理や、より良い品種の育成に不可欠です。多くの果実作物では、果実発達は単一 S 字または二重 S 字曲線に従うことが知られています。すなわち、果実は発達初期にゆっくりと成長し、その後急速な肥大期を迎え、成熟に近づくにつれて再び成長が緩やかになるという共通した時間的パターンを示します。しかし、これらの成長曲線は果実全体を一つの均一な器官として捉えたモデルであり、果実内部のどの部分が、いつ、どの程度成長しているのかといった「空間的な違い」を十分に説明することはできません。実際には、果実の形や最終的なサイズ・外観は、果実内の部位ごとに異なる成長の積み重ねによって形成されており、この空間的な成長の偏りこそが、多様な果形や個体間のばらつきを生み出す重要な要因であると考えられます。そのため、果実発達を真に理解するためには、従来の時間軸に基づく成長モデルに加えて、成長が「どこで起きているのか」という空間的な視点から捉えることが不可欠です。

２．研究手法・成果

本研究ではまず、果実形状の多様性が大きいカキを対象として解析を行いました。我々のこれまでの研究では、3D 解析によって品種間の果実形状の違いを効果的に定量できることを示してきましたが（Kusumi et al., 2024)、果実内の部位ごとの成長の違い、すなわち成長勾配の観点までは十分に明らかにできていませんでした。そこで本研究では、果実の先端部から基部（ヘタ側）にかけて複数の点をマーキングし、時間の経過に伴う点の位置や点間距離の変化を解析することで、果実内の部位ごとの成長量を推定しました（第 1 図)。果実の縦横比が異なる複数のカキ品種を用いて、一定期間ごとに果実を収穫し 3D モデルを作製・計測した結果、いずれの品種でもヘタ側で成長が最も活発で、先端部に向かうにつれて成長が緩やかになるという共通した成長勾配が確認されました。一方で、扁平な果実では細長い果実に比べ、この成長勾配がより急になるなど、果実形状の違いに対応した品種間差も明らかになりました。

しかし、この方法では同一の果実を継続的に観察することができず、果実内成長の時間的な連続性や果実間差の評価には限界がありました。そこで本研究では、新たな手法として 3D Gaussian Splatting を導入し、果実の動画から高精度な 3D モデルを作製し部位別成長を解析するパイプラインを開発しました（第 2 図)。これにより、果実を収穫することなく、樹上における同一果実の成長を連続的に追跡することが可能となりました。この手法をモモやリンゴなど複数のバラ科果樹に適用した結果、カキと同様に、枝につながる果柄側の成長が特に活発であることが明らかになりました。さらに、果実全体の成長に対する各部位の成長をアロメトリ解析によって評価したところ、部位によって全体成長に対する相対的な成長の仕方が異なること、また発達段階に応じてその関係が変化する場合があることが示されました。加えて、成長が特に盛んな部位では果実間の成長量のばらつきも大きくなる傾向が認められ、成長の強さと形態の不均一性が密接に関係していることが明らかになりました。特徴的な形をもつセイヨウナシでは、果頂側の成長が相対的に大きいことが確認され、他の果樹とは異なる発達様式を持つ可能性が示されました。

３．波及効果、今後の予定

本研究は、果実発達に関する古典的な知見を最新の三次元解析技術によって再検証し、果実内の部位ごとに異なる成長の違いを可視化した点に大きな意義があります。果実の形や大きさが、どの部分の成長がどの程度進むかによって決まることを定量的に示したことで、品種ごとの形態特性の理解が深まり、果実品質の安定化や改良に向けた基礎的な知見を提供します。これは、育種における形質評価のみならず、摘果や栽培管理の改善、果実の裂果や変形といった生理障害の理解にもつながると期待されます。

また、本研究で確立した 3DGS を用いた非破壊・継続的な樹上果実の計測手法は、果実成長解析にとどまらず、樹形や着果状態の評価やその相互作用に関する解析など、幅広い園芸作物のフェノタイピングとモデリングへ応用可能です。今後は他の果樹への展開に加え、生理・遺伝・栽培管理情報等と組み合わせることで、果実形質形成の理解をさらに深化させ、持続的で高品質な果樹生産技術の発展へ貢献できるように研究を進める予定です。

４．研究プロジェクトについて

本研究は科研費・国際共同研究加速基金（A)「ゲノミクスと果実フェノミクスに基づく倍数体果樹育種の新展開」（21KK0269)、特別研究員奨励費「カキ果実成長の三次元モデリングと制御要因の解明」（24KJ1497)、JST BOOST「AI を活用した植物構造の計測と最適化に関する研究開発」（JPMJBY24F7)、ヒロセ財団研究助成の支援により行われました。

＜用語解説＞

3D Gaussian Splatting：複数方向から撮影した画像や動画をもとに、対象物を三次元的に再構築する機械学習手法の一つ。三次元空間中に配置されたガウス関数の集合として対象物を表現することで、高精度かつ高速に三次元形状を再現できる。

アロメトリ：生物の一部分の成長と全体の成長との数理的関係。全体の大きさの変化に対して、特定の部位がどの程度の割合で成長するかを評価することで、形態がどのように形成されるかを理解することができる。

＜研究者のコメント＞

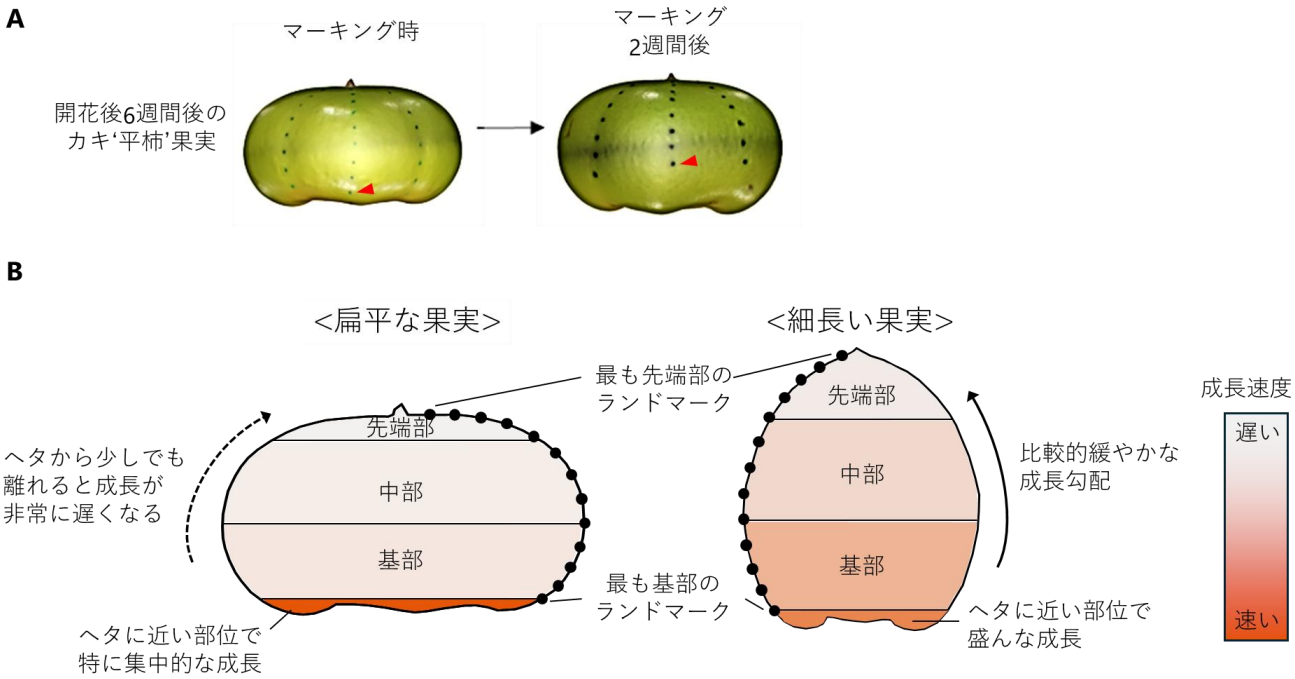
園芸の現場では果実全体の大きさが重視される一方で、果実の中の「どの部分がどれだけ育っているか」という点は、これまで十分に捉えられてきませんでした。本研究では、その見過ごされがちだった成長の偏りを三次元的に可視化できました。今後は、樹全体や栽培管理との関係も含めて成長を捉え、園芸研究の新しい展開を提示できるように、さらなる研究に邁進したいと考えております。

＜論文タイトルと著者＞

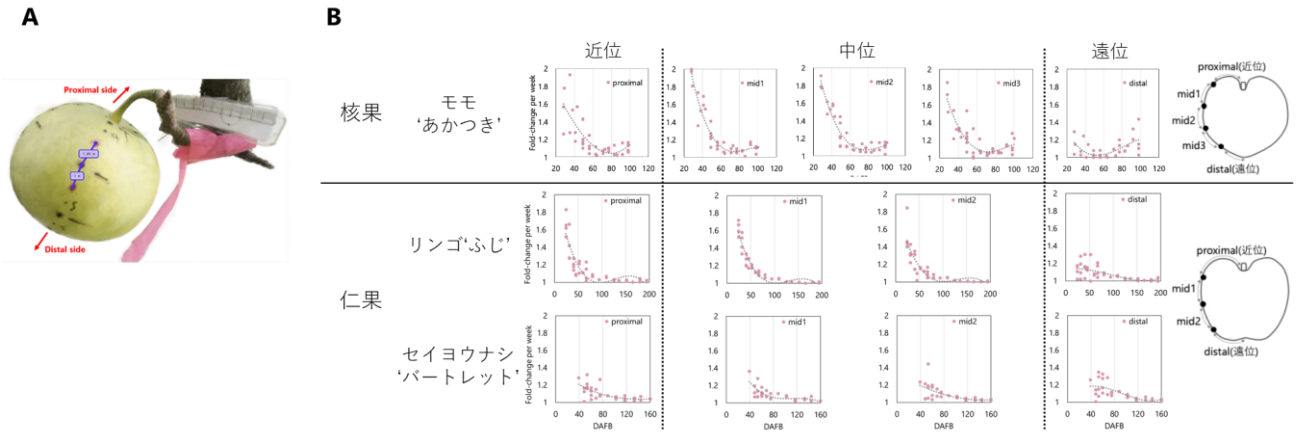
タイトル：Spatially resolved analysis of longitudinal fruit growth in persimmon (*Diospyros kaki*) via three-dimensional phenotyping（三次元フェノタイピングによるカキ果実の縦方向成長の空間解析）
著　　者：Akane Kusumi, Soichiro Nishiyama, Hisayo Yamane, Ryutaro Tao
掲 載 誌：Scientia Horticulturae
DOI：https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114401

タイトル：Spatially resolved analysis of growth dynamics in pome and drupe fruits of Rosaceae using 3D Gaussian Splatting（3D Gaussian Splatting を用いたバラ科仁果および核果における果実成長動態の空間解析）
著　　者：Ayame Shimbo, Soichiro Nishiyama, Akane Kusumi, Takuya Morimoto, Hisayo Yamane, Akihiro Itai, Ryutaro Tao
掲 載 誌：Plant Phenomics
DOI：https://doi.org/10.1016/j.plaphe.2026.100166

＜参考図表＞



第 1 図 カキの部位別成長モデリング A: 開花後 6 週間後（6 月下旬~7 月上旬に相当）のカキ‘平柿’の果実にマーキングした際の 3D モデルと、その 2 週間後の果実の 3D モデル。赤い三角で示す最も基部側のランドマークが、ヘタの方から先端側へと移動した。B: 果実内の成長速度の分布の模式図。



第 2 図 3DGS によるバラ科果樹の部位別成長解析 A: 3D モデル上における果実表面の点間の距離の測定。B: 一週間あたりの部位別成長率。横軸は満開後日数、縦軸は一週間あたりの成長率を示す。点は各果実の該当日における一週間あたりの成長率を、点線は三次多項式近似曲線を示す。