

総説 (招待)

作物の野外高速フェノタイピング：現状と挑戦

二宮正士^{1,2)}

(¹⁾ 東京大学大学院・農学生命科学研究科, (²) Plant Phenomics Research Center, Nanjing Agricultural University, China)

植物の遺伝子型解析が急速に進歩しているのとは対照的に、植物の表現型解析(フェノタイピング)は植物科学のボトルネックとなってきた。そのため、植物の高速フェノタイピング(High-throughput Phenotyping, HTP)研究が促進され、関連の論文数も急速に増加している。当初、HTPの研究開発は、屋内の制御された環境下におけるモデル植物種のためのHTPを目指していた。しかしその後、この開発は野外圃場における作物のためのHTPに移行した。不安定な環境条件下にある圃場でのHTPは、制御された環境下でのHTPに比べて、はるかに困難であるが、近年のHTP技術の進歩により、これらの困難を克服し、迅速、効率的、非破壊的、非侵襲的、定量的、再現性の

ある、客観的な表現型解析が可能になってきている。近年のHTP開発は、機械学習、画像解析、3次元再構築、画像センサー、レーザーセンサー、環境センサー、ドローンなどのデータ解析技術、センサー技術、ロボット技術の進歩と、高速な計算機資源により加速している。本稿では、最近のHTP技術について、主に主要作物のキャノピー単位の表現型(キャノピー高、植被率、バイオマス、ストレス状態など)に加え、圃場での作物器官の検出・計数に焦点を当てて概観する。また、圃場でのHTPに関する最近の話題を紹介した後、実用的な育種プログラムへのHTPの導入率が低いことについても議論する。

Breeding Science 72: 3–18 (2022)

形態記述子による形態形質のモデルベース植物フェノミクス

野下浩司^{1,2)}・村田英和¹⁾・切江志龍³⁾

(¹) 九州大学大学院・理学研究院生物科学部門, (²) 九州大学・植物フロンティア研究センター, (³) 早稲田大学理工学術院・電気・情報生命工学科・生命美学プラットフォーム (metaPhorest), 先端生命医科学センター (TWIns))

植物の形態形質は、受光態勢や耐倒伏性、ガス交換効率、種内/種間における空間を巡る競争、耐病性など多くの重要な機能的特徴へ寄与する。こうした形態形質を定量化するための植物フェノタイピング技術の重要性は分子育種戦略の進歩とともに増しているが、形態形質を表現するためのモデルの欠如に起因する計測データと表現型値の間のギャップや定量性およびスループットの低さは植物フェノタイピング技術の発展の障壁になっている。本レビューでは、形態形質の植物フェノタイピングに利用できる形態記述子を紹介する。幾何学的形態測定学的アプローチは、単一要素に適用可能な汎用手法となりえる。また、植物形態にしばしば観察される不定数の構成要素からなる

階層構造は、位相的データ解析を使用することで、マルチスケールな位相特徴量の観点から定量化できるだろう。理論形態モデルは、対象特異的な解剖学的構造を、それと認識できるならば、定量的に把握することが可能である。これらの形態記述子は、限られたサイズのデータセットに基づいても頑健に定量化できるなど、モデルベース植物フェノタイピングの優位性を提供してくれる。さらに、モデルベース計測とモデル精緻化のシステムが、形態モデルの欠如やフェノタイピングプロセスのスケールアウトが難しいといった課題を解決する将来の可能性について議論する。

Breeding Science 72: 19–30 (2022)

植物と樹木の3次元モデリングおよび再構成：コンピュータグラフィックス、コンピュータビジョン、植物フェノタイピングに関する横断的レビュー

大倉史生

(大阪大学大学院・情報科学研究科)

本論文では、植物や樹木の3次元(3D)モデリングと再構

成に関する過去と現在の動向をレビューする。これらのトピック

クは、コンピュータビジョン、グラフィックス、植物フェノタイピング、林業など、複数の研究分野で研究されてきた。そこで、本論文は本研究分野に関する横断的なレビューを提供することを目的とする。本論文ではまず、植物のモデル化や再構築のためのあらゆる手法の基礎となる、植物の形状や構造の表現手法をまとめる。さらに、植物モデリングの手法を、1) 実在

しない植物を作成する手法 (*modeling*) と、2) 実在する植物から3次元モデルを作成する手法 (*reconstruction*) に分類して解説する。本論文は現在の手法の限界と、考えられる将来の方向性についても議論する。

Breeding Science 72: 31–47 (2022)

デジタル化と自動化による植物根系フェノタイピングの効率性の向上

寺本翔太・宇賀優作

(農研機構・作物研究部門)

根系構造 (Root System Architecture: RSA) は土壌中に不均一に分布する養水分の利用可能性を決定する。したがって、RSAの遺伝的改良は作物生産に関連する。しかしながら、土中の根の計測は困難かつ労力がかかることから、RSAのフェノタイピングは地上部のフェノタイピングほど実施されていない。近年の進歩は植物計測のデジタル化に繋がった。このデジタルフェノタイピングは地上部形質とRSA形質の双方の計測に広く利用されている。根は土中に隠れているため、RSAのデジタルフェ

ノタイピングは地上部形質と比べ遅く困難である。本総説では、RSA形質のデジタルフェノタイピングの近年の傾向をまとめた。私達はサンプルのカテゴリを3つに分類した。それぞれ、根を含むブロック、ブロックの断面および根サンプルである。それぞれのカテゴリについてデジタルフェノタイピングの使用例を紹介する。また、私達はそれぞれのカテゴリに属するデジタルフェノタイピングの改良の余地について議論した。

Breeding Science 72: 48–55 (2022)

植物育種における近年のメタボロミクスの活用

櫻井 望

(システム研究機構・国立遺伝学研究所・生命情報・DDBJセンター)

代謝産物は生物の生命維持において中心的な役割を果たしており、作物においては、栄養価、香り、色、ストレス耐性などの表現型の決定に関与している。生物のオーム科学において、メタボロームは表現型の最も近くに位置付けられている。したがって、メタボロミクスは、化合物組成の変化のモニタリング、細胞機能の背景にあるメカニズムの解明、マーカー探索や診断、mQTL、mGWAS、代謝物のゲノミック予測などの表現型解析手法として、作物の改良に用いられてきた。本総説では、植物

育種に関する研究においてメタボロミクスが活用されている近年の事例359論文を調査した。主要作物に加え、希少な薬用植物を含む160以上の作物が取り扱われていた。メタボロミクスを活用しようとする際の課題は、データ取得のために様々な分析装置が使われることと、代謝産物の同定および定量にあまい性が存在することである。植物育種におけるさらなるメタボロミクスの活用のため、本技術の特徴や展望について議論する。

Breeding Science 72: 56–65 (2022)

原著論文

面積が狭い育種圃場に適したオープン・ハイスループットフェノタイピングローバーの開発

黒木 健^{1,2)}・顔 開³⁾・岩田洋佳⁴⁾・清水健太郎^{5,6)}・爲重才覚^{6,7)}・那須田周平¹⁾・郭 威⁸⁾

(¹⁾ 京都大学大学院・農学研究科, ²⁾ 東京大学大学院・理学系研究科, ³⁾ LabRomance 株式会社, ⁴⁾ 東京大学大学院・農学生命科学研究科, ⁵⁾ チューリッヒ大学・進化生物学・環境学研究所, ⁶⁾ 横浜市立大学・木原生物学研究所, ⁷⁾ 新潟大学・理学部, ⁸⁾ 東京大学大学院・農学生命科学研究科附属生態調和農学機構)

育種における選抜過程の効率化が求められる中、フェノタイピングの重要性が増大している。手作業によるフェノタイピン

グはその効率化に限りがあるため、センサーや画像処理技術の発展を活かしたハイスループットフェノタイピングの手法が近年注目されている。しかしながら、日本やアジア諸国に多く見られる面積の限られた育種圃場においては、大型装置の導入や無人航空機の飛行によるハイスループットフェノタイピングの実施が困難であることも多い。本研究において、我々は広い面積や設備の導入を必要とせずに、野外においてハイスループットフェノタイピングを行うことのできるローバーを開発した。本ローバーの設計はオープンソース・ハードウェアとして公開

しており、誰もが容易かつ低コストで組み立てやすくなる改造を行うことができる。我々の試験運用において、本ローバーは野外において作物の精細なリモートセンシング画像を取得することができ、それらの画像の解析により植物の形質を定量的に得ることができた。これらの結果は、今回開発したローバーが狭小な育種圃場においても効率的なフェノタイピングを行う手段として有用であることを示す。

Breeding Science 72: 66–74 (2022)

複数画像による植物全周3次元モデリング装置とその構成

高地伸夫¹⁾・林 篤司¹⁾・篠原洋太¹⁾・七夕高成²⁾・兒玉晋洋²⁾・磯部祥子²⁾

(¹⁾農研機構・農業ロボティクス研究センター・野菜花き研究部門, ²⁾かずさDNA研究所・先端技術研究部門)

非接触、非破壊で植物を計測できる画像による植物の全周3次元モデリング装置を研究開発した。本装置は、複数の画像から SfM-MVS を改良した方式で3次元再構築を行う方式で、カメラ撮影のみで3D構築が可能である。画像による方法は、ハードウェアおよびソフトウェアを市販品で構成できるとともに、植物の形状や大きさに合わせてカメラを1台から複数台利用でき自由度が高い。本手法の最大の利点は、撮影さえしておけば、

いつでも3D再構築が行え、2D画像、3D点群から好きな箇所を観察し計測、解析できる点にある。本装置により、草丈数 mm ~ 2.4 m までの大きさの植物を 1 mm ~ 2 mm の精度で3D計測・モデリング可能である。本論文では、開発した装置とその構成の原理ならびに得られたモデルの精度について説明する。

Breeding Science 72: 75–84 (2022)

AGVを用いた植物搬送システムと植物移動デバイスの開発—DIY植物形質計測の事例—

七夕高也¹⁾・兒玉晋洋¹⁾・橋口拓勇²⁾・猪俣大輔³⁾・田中秀典⁴⁾・磯部祥子¹⁾

(¹⁾かずさDNA研究所・先端研究開発部, ²⁾宮崎大学・農学部, ³⁾すあなサイエンス, ⁴⁾宮崎大学大学院・農学工学総合研究科)

近年、植物の計測技術開発は盛んに行われているが、柔軟性や低コストが求められることもあり、農学研究分野への導入は期待されるほどは進んでいない。DIY (Do It Yourself) 方式はこのような障害を克服するための効率的な方法である。モジュール化された機能を持つデバイスは研究者が柔軟に設計できるため、DIYによる実験において重要である。本研究では、DIYによる植物形質計測の事例として、市販のAGV (Automated Guided Vehicle) を用いた植物搬送システムを開発した。搬送モジュールは、走行デバイスと植物移動デバイスの2つのデバイスから構成されている。走行デバイスは、市販のAGVキットをベースに開発した。植物移動デバイス、植物架台および鉢

のアタッチメントは、我々および開発関係者が独自に設計・製作したものである。また、各デバイスを接続し、システムを運用するためのソフトウェアも開発した。走行ルートは磁気テープで設定し、簡単に変更・迂回ができるようにした。我々の植物搬送システムは、低コストで自由度が高く、我々だけでなく、他の‘DIY’植物研究にも貢献できるユニットとして開発された。開発した装置は、温室における植物の多様な形質観察だけでなく、植物育種や農業生産における他の重要な作業においても貢献することが期待できる。

Breeding Science 72: 85–95 (2022)

こま切れ画像法によるアクションカメラ画像を用いた外来植物の自動識別およびシチズンサイエンスの可能性

高屋浩介¹⁾・佐々木優²⁾・伊勢武史³⁾

(¹⁾ 京都大学大学院・農学研究科, ²⁾ 京都大学・学際融合教育研究推進センター, ³⁾ 京都大学・フィールド科学教育研究センター)

外来植物の効果的な対策のためには定期的なモニタリングが必要である。これまで衛星画像を用いて外来樹木を検出する取り組みはあったが、外来草本の検出は困難であった。本研究では2つのアクションカメラで撮影した画像からディープラーニングで外来草本の検出が可能かどうか検証した。我々はこま切れ画像法を使用して教師画像を作成し、カメラごとにモデルを作成した。本手法により外来植物セイタカワダチソウ (*Solidago*

altissima) の検出ができ、検出精度は89%であった。本研究により安価なアクションカメラと深層学習を組み合わせることで外来植物の自動検出が可能であることが示された。今後は、シチズンサイエンスも活用することで外来植物の分布調査を省コストかつ広範囲で実施できる可能性がある。

Breeding Science 72: 96–106 (2022)

Google Street View を用いたディープニューラルネットワークによる市街地の緑の評価

亀岡大真¹⁾・打田篤彦¹⁾・佐々木優¹⁾・伊勢武史²⁾

(¹⁾ 京都大学・学際融合教育推進センター, ²⁾ 京都大学・フィールド科学教育研究センター)

都市部における緑の重要性は、従来から生態学的・美的観点、および公衆衛生学や社会科学の分野でも議論されている。近年の実証研究の進展は「ビッグデータ」と「自動画像認識」の組み合わせによって可能となっている。しかし、都市部の緑に対する自動画像認識の既存の手法では、緑色の人工物の誤検知やモデル学習に過大なコストがかかるなどの問題がある。本研究では、既存の手法が有する課題を改善するために、Google

Street View 画像と「細切れ画像法」を用いて、特定の都市部の緑視率を決定するためのパッチベースド・セマンティック・セグメンテーション法を適用することを提案している。本手法によって、様々な分野での都市緑地に関する研究の可能性が広がることを期待する。

Breeding Science 72: 107–114 (2022)