

農家を主体とする現地実証試験に適したデータ解析手法の開発
田中貴 (岐阜大学応用生物科学部)

農家圃場における作物の収量・品質の高位安定化には、現場レベルでの制限要因の解明および、その要因に応じた栽培管理技術の最適化が求められる。そのために現地実証試験は必要不可欠であるものの、農家圃場における環境要因の制御は非常に困難である。また、現地実証試験には、調査や試験設計に多大な労力を要する反面、得られる試験結果の信頼性は著しく低く、実証試験の成果を正しく現場に還元することは困難である。一方、人工衛星・ドローンによるリモートセンシングや収量コンパインの登場により、農家圃場においても、作物の生育情報を面的かつ容易に把握できるようになった。そこで、本業績は、農家圃場での栽培試験を適切に評価するための基盤技術を創出することを目的として行われた研究である。得られた成果は以下のように要約される。

1. UAV リモートセンシングと機械学習による作物の収量・品質推定技術の開発

これまで人工衛星や航空機によるセンシングで得られる分光反射率やNDVIを代表とする植生指数を用いて作物の収量・品質を非破壊で推定する研究が盛んに行われてきたが、線形回帰などの古典的な統計手法が解析手法として主に用いられてきた。本研究では、UAVによる近接リモートセンシング技術と機械学習モデルを用いることで、作物の収量・品質の推定精度が向上できるかどうかを検証した。岐阜県内の農家圃場において、マルチスペクトルカメラを搭載したUAVを用いて、登熟初期にコムギ群落の分光反射率を取得し、収量・子実タンパク質含有率を収集した。説明変数として、分光反射率や多様な植生指数、DSM由来の草丈を用いた多様な機械学習モデルを用いて、コムギ収量および子実タンパク質含有率の推定誤差を比較した。その結果、収量推定では、植生指数の一つであるEVI2を説明変数とする線形回帰モデルが最も推定誤差が小さく、子実タンパク質含有率推定では、分光反射率を説明変数とするランダムフォレストが最も推定誤差が小さかった(業績4)。期待に反して、説明変数への草丈の追加や機械学習モデルの導入によって、収量の推定精度は向上しなかった。その理由として、作物の刈り取り調査範囲(約 $1 \times 1 \text{ m}^2$)の分光反射率や植生指数を平均値化したことによって、UAVが得意とする高解像度な情報を有効活用できていないことが考えられた。そこで、画像データを平均値化せずに、特徴量として形態情報なども抽出することができる畳み込みニューラルネットワークを用いたイネおよびコムギの収量推定モデルを構築したところ、高解像度な反射率の画像データを用いることで、推定精度を著しく向上させることに成功した(業績2)。さらに、UAV画像や衛星画像、深層学習を始めとする機械学習アルゴリズムを用いることで、広域のダイズ個体密度を推定する技術を開発した(業績1)。以上より、UAVや人工衛星によるリモートセンシング技術と機械学習を活用することで、圃場内の収量変動やその構成要素となる個体密度を瞬時に評価できる手法を開発した。

2. 圃場内の作物収量変動要因の解析に適した空間統計モデルの開発と実証

岐阜県海津市の大規模区画水田におけるコムギの圃場内収量変動要因を明らかにし、栽培管理の適正化に資するために、1筆当たり約100地点のコムギの苗立ち数や収量、収量構成要素、土壌特性値の分析を行い、構造方程式モデリングによる要因解析を実施した。その結果、コムギの収量と熱水抽出性窒素などの土壌化学性とは無相関であった。一方、コムギの圃場内収量変動の因果関係として、砂含有量の直接的な収量への効果と、苗立ち数を介した砂含量の間接的な収量への効果が示唆された(業績5)。さらに、収量は強い空間依存性を示したことから、実験では未観測な土壌要因による圃場内収量変動が示唆された。また、施肥ムラなど作業の方向性に起因する収量変動も認められた。そもそも農家圃場試験において土壌や栽培管理などの要因を全て量的に評価することは、広く現地実証試験を進めるためにも現実的ではない。そこで、本研究を通じて、農家圃場における収量変動要因を適切に評価するためには、収量の空間変動をモデリングする必要性が考えられた。

収量の空間変動が認められる農家圃場において、収量変動要因を適切に評価できるようにするために、圃場内収量の残差をランダム効果として取り扱う空間線形混合効果モデルを開発し(業績3)、そのソースコードをGithub(<https://github.com/takashit754/geostat>)に広く公開した。本モデルの有効性を検証するために、業績4で得られた収量マップや収量コンパインのデータを用いて、擬似的な試験区に乱数を加算する施肥試験をシミュレーションすることで、農家圃場スケールの実証試験において、試験区の配置や統計モデルの選択が、試験精度に及ぼす影響を評価した。その結果、従来の最小二乗法による収量変動要因の解析では、第一種の過誤を犯す確率が非常に高い上に、処理の効果の推定バイアスが大きくなることが認められた。一方、空間線形混合効果モデルを用いることで、農家圃場における簡易的な試験区配置でも、第一種の過誤が発生するリスクを回避しつつ、推定バイアスを低下できることを示した。前述の通り、施肥や播種といった作業の方向性によって作物収量の空間変動の傾向が変化することから、この異方向性を明示的にモデリングすることで、推定バイアスのさらなる低下が示唆された。さらに、実際の岐阜県内の複数の農家圃場において、農家所有の作業機で実施可能な簡易的な試験区配置によってイネとコムギを対象に施肥試験を実施したところ、多くの圃場で農家が積極的に行う基肥の増肥が多収化に直結せず、変動費である施肥コストの増加によって収益が低下することを示した(業績2)。本成果は、農家圃場における実証試験を広く行うことで、施肥コストを低減できる可能性を示唆するものである。

本業績では、研究機関の試験圃場に比較して、不確定要素が多い農家圃場における現地実証試験において、処理の効果や土壌要因の影響を正確かつ量的に評価できる基盤技術として、リモートセンシングや機械学習による作物の収量推定技術、そして、統計学のアプローチを開発してきた。従来の農家圃場における現地実証試験は、労力をはじめとする様々な制約によって、事例調査にとどまる例も少なくなかったが、農学研究的フィールドを試験圃場から農家圃場に拡張する新たな方法論として、本研究業績の活用と今後のさらなる発展が期待される。また、これら一連の研究成果に関して、OECD後援の国際会議#OFE2021(Farmer-centric On-Farm Experimentationに関する初の国際学会)の連続公開プレウェビナー第3回目Data and analyticsにおいて、“Rethinking Experimental Designs and Data Analysis for On-Farm Experimentations”と題した招待講演を行い(講演内容はウェブ上で一般公開:<https://www.ispag.org/Events/OFE>)、研究成果を広く社会に発信した。国際精密農業学会のOn-Farm Experimentation Communityのワーキンググループ構成員として、本ウェビナーの運営のみならず、農家圃場における栽培試験のデータ解析に関するガイドライン作成に貢献している。以上より、日本作物学会研究奨励賞に十分値する業績であると評価される。

研究業績

1. Habibi, L.N., Watanabe, T., Matsui, T., & Tanaka, T.S.T. (2021). Machine learning techniques to predict soybean plant density using UAV and satellite-based remote sensing. *Remote Sensing*, 13 (13), 2548. <https://doi.org/10.3390/rs13132548>
2. Tanaka, T.S.T., Tanabe, R., & Matsui, T. (2021). Can on-farm experiments benefit intensive farming systems with small- to moderate-scale fields? *Precision Agriculture*, 21, 861-867. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_103
3. Tanaka, T.S.T. (2021). Assessment of design and analysis frameworks for on-farm experimentation through a simulation study of wheat yield in Japan. *Precision Agriculture*, 22, 1601-1616. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09802-1>
4. Zhou, X., Kono, Y., Win, A., Matsui, T., & Tanaka, T.S.T. (2021). Predicting within-field variability in grain yield and protein content of winter wheat using UAV-based multispectral imagery and machine learning approaches. *Plant Production Science*, 24 (2), 137-151. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1819165>
5. Tanaka, T.S.T., Kono, Y., & Matsui, T. (2019) . Assessing the spatial variability of winter wheat yield in large-scale paddy fields of Japan using structural equation modelling. *Precision Agriculture*, 19, 751–757. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_93