

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14452

研究課題名（和文）大規模区画圃場における小麦・大豆の収量・品質の高位安定化を目指した作物学的研究

研究課題名（英文）Agronomic studies on wheat and soybean production with high stability of yield and quality in large-scale paddy fields

研究代表者

田中 貴（Tanaka, Takashi）

岐阜大学・応用生物科学部・助教

研究者番号：20805436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、大規模区画圃場において、作物の収量・品質に及ぼす要因を、圃場の前歴や作物の前後作との相互関係、土壌要因などの観点から明らかとし、作物の生産性向上に向けた方策を提示することを目的としている。成果として、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによるリモートセンシング技術と機械学習を用いることで、小麦の収量及び子実タンパク質含有率を推定するモデルを開発した。また、土壌特性値を効率的に空間補完できるサンプリング手法を確立できた。さらに、土壌特性値や過去の作業体系・土地利用が作物の収量等に及ぼす影響を評価する上で、未観測な土壌要因を考慮する統計手法として空間線形混合効果モデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、大規模区画水田において、収量の空間変動は無視できない上に、調査で観測できなかった土壌要因の影響が大きかった。そのため、大規模区画水田における収量・品質の変動要因解析には、本研究の成果で実装した空間線形混合効果モデルを要因解析に用いることが望ましい。本手法は、現場レベルで普及がすすむリモートセンシングや収量コンバインなどの空間データを有効利用できるため、農家圃場調査の基盤技術となりうる。

研究成果の概要（英文）：The final goal of this study was to provide a solution for improving crop productivity in large-scale paddy. For that purpose, this study evaluated the effect of previous field management, cropping sequence, and edaphic factors on the crop yield and quality. The study mainly established: 1) the prediction model for winter wheat yield and grain protein using UAV-based remote sensing and machine learning; 2) the efficient soil sampling approach for digital soil mapping; and 3) the spatial linear mixed model that can account for the spatial variations in yield residuals due to the soil properties and previous crop management.

研究分野：作物学

キーワード：大規模区画圃場 小麦 大豆 リモートセンシング 2年3作輪作体系 空間変動解析 作業体系

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本の水田農業では、作物生産の省力低コスト化を実現するために、大規模区画圃場の造成や、集落内の隣接する圃場の集合体をひとつの農場として営農する集落営農や個別大規模経営などによる経営の規模拡大が進められている。申請者が研究対象とする岐阜県海津市では、全国的にも稀に見る先進的で大規模な経営体(100ha以上)が複数存在し、10a~50aの圃場を合筆造成した大規模区画圃場(1~2ha)において、土地利用率の高い2年3作輪作体系と低コスト技術として乾田直播が導入されている。これは、日本農業で求められてきた理想像のひとつであるが、現実の小麦・大豆の収量は低く、その品質は不安定である。日本の水田農業が、激しい国際競争の中で生き残るためには、水稲だけでなく、輪作体系全体における作物の多収・高品質化が鍵をにぎる。そこで、大規模区画水田における輪作体系(水稲・小麦・大豆)の生育・収量・品質の高位安定化のための技術開発を目指し、基礎的データの収集・解析が必要となる。

ここで、圃場内環境の変動が大きな大規模区画圃場において、作物生育の評価手法が確立されていないことが問題となっており、大規模区画圃場の前歴(合筆による土壌特性の違い)を考慮する必要がある。また、低コスト・省力化のために導入されている水稲の乾田直播は、その作業体系(代かきの省略や踏圧)によって土壌物理性を大きく改変すると同時に、乾田状態の長期化が地力減耗を促進することから、水稲の生産性に影響することが知られている。乾田直播を2年3作体系に導入した場合、後作の小麦・大豆の生育にも影響する蓋然性が高いものの、これまでの直播栽培に関する研究は、水稲の生産性だけを対象としてきた。大規模区画水田の輪作体系において、乾田直播が後作である小麦・大豆へ及ぼす影響、すなわち、作物間の相互関係から解析することが、従来の研究や技術開発の視点から欠落している。

### 2. 研究の目的

本研究では、将来の日本農業を牽引する大規模経営における大規模区画水田の水田輪作体系において、作物の生育・収量・品質の制限要因の解明を目的とする。その要因のひとつとして、水稲の移植と乾田直播との作業体系の違いを取り上げ、後作の小麦・大豆の生育・収量・品質に及ぼす影響を解明する。

### 3. 研究の方法

実際の農家圃場では、気象・土壌・栽培管理などの多くの要因が存在するため、作物の収量・品質を決定する要因を解明することは困難であるとされてきた。これまで、複数の変数間の因果関係を分析するために、共分散構造分析と呼ばれる統計手法が、主に生態学や社会学の分野で行われてきた。申請者は、この共分散構造分析を適用することで、本申請の研究で抽出された要因(水稲・小麦・大豆の相互関係を含む)の関連性を定量的に評価できると考えた。また、本研究が調査対象とする海津市では、合筆が困難であった宅地周辺を除く全域で、1~2haの大規模区画圃場が造成され、乾田直播の普及率は約20%に達している(全国の直播普及率は約2%)。先進的な土地利用型の大規模営農に対応している海津市は、本研究領域として稀に見る調査適地である。

#### (1) 大規模区画圃場における作物の収量・品質を支配する土壌特性値の空間変動解析

作物の生育に及ぼす影響を明らかにするためには、まず圃場内の土壌特性値の空間分布を把握する必要がある。水稲の移植もしくは乾田直播栽培を継続的に実施してきた圃場群(約30ha)で、土壌を採取した。小麦播種前(10月下旬)および大豆播種前(6月下旬)に、10-50mメッシュの交点上において、作土層の土壌を採取し、一般的な土壌特性値を分析した。分類された土地利用履歴ごと、そして、全体を対象に、大規模区画圃場内の土壌特性値の空間変動解析を実施し、土壌特性値の空間依存性を評価した。

#### (2) ドローンを用いた作物の非破壊調査と収量・品質との関係性の解析

農家圃場において、広域かつ簡易的に収量や品質データを取得できる基盤を構築するために、小麦の茎立期以降に、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによる植生指数の評価を実施した。反射率や植生指数、DSMに由来する草丈を説明変数とし、目的変数を収量・子実タンパク質含有率とする予測モデルを、複数の機械学習モデルを用いて作成し、それらの推定誤差を比較した。

#### (3) 小麦・大豆の収量・品質に影響する仮説モデルの構築

小麦・大豆の収量・品質に及ぼす影響は、「土壌分析値の空間依存性に起因するものなのか」もしくは「水稲栽培の作業体系に起因するものなのか」を明らかにするために、上述の(1)および(2)で得られたデータや先行文献をもとに、小麦の収量・品質に及ぼす影響を考察した仮説モデルを作成し、共分散構造分析を利用することでモデルの適合度を検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 大規模区画圃場における作物の収量・品質を支配する土壌特性値の空間変動解析

500点以上の土壌試料を分析した結果、土壌特性値を効率的に空間補完できるサンプリング手法を最適化できた。従来の国内における水田土壌の研究では、土壌マップの作成には、10mメッシュが推奨されてきたが、本研究で対象とする津市の大規模区画水田では、いずれの土壌特性値でも30m間隔の土壌採取で十分であることを確認できた。これによって、広域土壌マップを作成し、作物の収量や品質に及ぼす影響を評価する体制が構築できた。一方で、ブロックローテーションのブロック間で交換性陽イオンなどの土壌特性値が大きく異なっていたことから、土壌改良のための土壌分析は毎作実施する必要性が示唆された。水稻の乾田直播と移植圃場との間には、土壌化学性において有意な差は認められなかった。

### (2) ドローンを用いた作物の非破壊調査と収量・品質との関係性の解析

様々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(Zhou et al., 2021)。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1×1m<sup>2</sup>)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(Tanaka et al., 2021)。以上より、UAV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、圃場内の収量変動を1mメッシュで評価できる手法を開発した。

### (3) 小麦・大豆の収量・品質に影響する仮説モデルの構築

構造方程式モデリングによる要因解析を実施した結果、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(Tanaka et al., 2019)。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。大豆も同様に、苗立ち数が収量変動の支配要因であった。つまり、小麦・大豆の両作物ともに、農家圃場において、出芽苗立の安定化が多収化に向けた課題であることを明らかにした。また、収量は強く空間依存性を示した。いずれも圃場間の土壌特性が大きく異なっていたことから、当初の仮説に反して、対象とした圃場では、水稻の作業体系による影響は検出できなかった。

土壌特性と収量との相関関係が弱い上に、収量には強い空間変動が認められたことから、収量変動の因果関係を解析するために構造方程式モデリングを適応することは推定バイアスを増大させる可能性が見積もられた。そこで、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(Tanaka 2021)、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、(2)で得られた収量マップや収量コンバ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。

研究計画時には予期せぬ課題として、未観測データによる収量の空間変動が発生するという問題が新たに発生したが、上述の空間線形混合モデルによって、適切な統計処理を実施できる技術基盤を構築することができた。

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 (accepted).

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. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09802-1>

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>

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](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_93)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Zhou Xinbin, Kono Yusuke, Win Aung, Matsui Tsutomu, Tanaka Takashi S. T.	4. 巻 24
2. 論文標題 Predicting within-field variability in grain yield and protein content of winter wheat using UAV-based multispectral imagery and machine learning approaches	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 137 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1343943X.2020.1819165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Tanaka T.S.T., Kono Y., Matsui T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Assessing the spatial variability of winter wheat yield in large-scale paddy fields of Japan using structural equation modelling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Precision Agriculture 2019	6. 最初と最後の頁 751-757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3920/978-90-8686-888-9_93	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka Takashi S. T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Assessment of design and analysis frameworks for on-farm experimentation through a simulation study of wheat yield in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Agriculture	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11119-021-09802-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka T.S.T., Tanabe R., Matsui T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Can on-farm experiments benefit intensive farming systems with small- to moderate-scale fields?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Agriculture '21	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 ルスファン・ヌル・ハビビ, 松井勤, 田中 貴
2. 発表標題 UAVリモートセンシングと機械学習によるダイズ個体密度のハイスループット計測技術の開発
3. 学会等名 日本作物学会第249回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 貴
2. 発表標題 ベイズ推定による農家を主体とする栽培試験の解析手法の検討
3. 学会等名 日本作物学会第249回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中貴, Xinbin Zhou, 松井勤
2. 発表標題 UAVリモートセンシングと機械学習による小麦の収量および子実タンパク質含有率の推定
3. 学会等名 日本作物学会第249回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi S. T. Tanaka
2. 発表標題 Agricultural innovation facing climate change
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi S. T. Tanaka, Yusuke Kono, Tsutomu Matsui
2. 発表標題 Assessing the spatial variability of winter wheat yield in large-scale paddy fields of Japan using structural equation modelling
3. 学会等名 12th European Conference on Precision Agriculture (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中貴, 松井勤
2. 発表標題 空間統計モデルによる大区画圃場内におけるダイズ品質変動要因の解析
3. 学会等名 システム農学会2019年度春季一般研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中貴, 渡辺一生, 松井勤
2. 発表標題 UAVリモートセンシングおよび高頻度衛星画像と発育モデルの結合によるダイズ個体密度の推定法
3. 学会等名 日本作物学会第247回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中貴, 松井勤
2. 発表標題 岐阜県の大区画水田における転作ダイズ低収要因の解析
3. 学会等名 日本作物学会第247回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi S. T. Tanaka, Yusuke Kono, Tsutomu Matsui
2. 発表標題 Applications of Structural Equation Modeling in Crop Yield Variability of the Farmers' Fields
3. 学会等名 6th International Workshop Sustainability of Crop Production and Productivity Under Global Climate Change (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi S. T. Tanaka
2. 発表標題 Sustainable crop and soil management: case studies in Southwest China and Japan
3. 学会等名 Sustainable Soil Health Management to Support Healthy Life (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中貴, 河野友祐, 松井勤
2. 発表標題 UAVリモートセンシングを活用した大規模区画水田における小麦収量の推定
3. 学会等名 日本作物学会第246回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 何景雲, 松井勤, 田中貴
2. 発表標題 大規模区画水田における土壌特性の評価に有効なサンプリング設計
3. 学会等名 日本作物学会第251回講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Tanaka T.S.T., Tanabe R., Matsui T.
2. 発表標題 Planet 衛星の画像解析によるコムギ収量予測に必要なサンプルサイズは?
3. 学会等名 日本作物学会第251回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中貴
2. 発表標題 現地実証試験に適した空間線形混合モデルの開発
3. 学会等名 日本作物学会第250回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi T.S.T.
2. 発表標題 Rethinking Experimental Designs and Data Analysis for On-Farm Experimentations
3. 学会等名 #0FE2021 Pre-Conference Theme 3 Data and analytics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi S. T. Tanaka, Ryoya Tanabe, Tsutomu Matsui
2. 発表標題 Can on-farm experiments benefit intensive farming systems with small- to moderate-scale fields?
3. 学会等名 13th European Conference on Precision Agriculture (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------