

委託試験成績（令和3年度）

担当機関名 部・室名	山口県農林総合技術センター 農業技術部・土地利用作物研究室
実施期間	令和元年度～3年度、継続
大課題名	V 情報処理等先端技術の活用による高生産システムの確立
課題名	リモートセンシングによるパン用小麦の生育量に応じた開花期追肥技術の開発
目的	<p>山口県ではパン用小麦「せときらら」の栽培面積は平成30年産以降1,000haを超え、県内で栽培される麦類のうち最大である。生産面積が拡大した一方で、実需者からは製パン性に影響する子実タンパク質含有率（以下、子実タンパク）の高位安定化（12.0%以上）を強く求められている。小麦の子実タンパクは開花期の窒素追肥で高めることができるが、一般的に収量と負の相関関係があるといわれており、子実タンパクを安定させるには収量水準に応じた追肥量の調整が必要である。これまでに山口県農林総合技術センターでは、「せときらら」において子実タンパクの目標値と収量から必要な開花期追肥量を算出できる追肥量予測モデルを作成している（村田・金子2021）。「せときらら」の収量を開花期までに予測できれば、この予測モデルに代入することで追肥量を算出し、開花期に可変施肥を行うことが可能である。本課題では令和元年～2年度の2年間で穂揃期のリモートセンシングによって「せときらら」の収量予測を可能とする収量予測モデルを作成した。この収量予測モデルと追肥量予測モデルを組み合わせることで植生指数と目標子実タンパクから必要な開花期追肥量を算出することが可能である。そこで、最終年度である今年度は上記の方法で算出した開花期追肥量の有効性を検証する。すなわち、穂揃期頃にリモートセンシングを行って目標達成に必要な開花期追肥量を算出するとともに、それを実際に「せときらら」に施用することで、子実タンパクが目標値に達するかどうかを検証する。なお、収量予測モデルは植生指数ごと異なるため、今年度はfarmeyeとGNDVIの2種類の植生指数について検証する。</p> <p>【引用文献】村田資治・金子和彦 2021. パン用コムギ品種「せときらら」における収量と開花期追肥量に基づく子実タンパク質含有率の推定. 日本作物学会紀事. 90:72-77.</p>
担当者名	村田資治

1. 試験場所 山口県農林総合技術センター農業技術部内圃場（山口市大内氷上）

2. 試験方法

【前年度までの成果】

パン用小麦「せときらら」において、2年間のデータを使用して穂揃期にリモートセンシングで取得した植生指数（farmeye、GNDVI）から収量を予測する収量予測モデルを作成した。この収量予測モデルと、既存の追肥量予測モデル（村田・金子 2021）を組み合わせることで、穂揃期頃のリモートセンシングによる子実タンパク向上のための可変施肥が可能になると考えられた。

【本年度の検討課題】

収量予測に基づく開花期の可変施肥の有効性を検証する。播種時期2水準で「せときらら」を栽培する。穂揃期頃のリモートセンシングを行って植生指数（farmeye、GNDVI）を取得する。このとき、群落を12分割して、3試験区を4反復で設置する。3試験区の内訳は可変F区（farmeyeを取得）、可変G区（GNDVIを取得）、対照区（両方取得）とする。取得した植生指数から収量予測モデルを使って収量を算出し、さらにその収量を使って追肥量予測モデルから追肥量を算出する。開花期に追肥を行い、成熟期に子実タンパクを調査して、目標値を達成したかどうか検証する。なお、対照区では植生指数を取得して収量および追肥量を算出するものの、これはモデルの精度検証のみに利用し、実際の追肥量は一律に窒素成分で6.0kg/10a（山口県慣行）とする。

(1) 供試機械名 Phantom M（ファームアイ社）

(2) 試験（実証）条件

ア. 圃場条件 礫質灰色低地土（大豆跡）

イ. 栽培等の概要

品種名 小麦「せときらら」

土壌改良 炭酸苦土石灰 100kg/10a

耕起 ロータリー耕 2020年11月26日（標播）、12月15日（晩播）

施肥 基肥（N:P:K = 14:17:13）播種時に3kg/10a施用

分けつ肥（N:P:K = 15:5:20）2021年2月3日に2kg/10a施用

穂肥（N:P:K = 15:5:20）2021年2月25日に2kg/10a施用

開花期追肥（N:P:K = 21:0:0）2021年4月22日。施肥量は後述。

※施肥量は全て窒素成分あたり。

播種 畝立て同時施肥播種（畝幅150cm、1畝4条）

2020年11月26日（標播）、12月15日（晩播）

除草 ガレスG 5kg/10a 2020年11月26日（標播）

バスタ液剤 300ml/100L/10a 2020年12月11日（晩播）

リベレーターG 5kg/10a 2020年12月17日（晩播）

ハーモニー75DF 10g/100L/10a 2021年2月3日

アクチノール乳剤 200ml/100L/10a 2021年2月24日

中耕培土 なし

病虫害防除 アミスターフロアブル 2000倍 2021年2月24日

チルト乳剤 25 1000倍 2021年4月9日（標播）

シルバキュアフロアブル 2000倍 2021年4月16日

ウ. 処理区

・処理水準 播種時期2水準×追肥量の算出方法3水準

・播種時期 標播、晩播

・追肥量の算出方法：farmeye（可変F区）、GNDVI（可変G区）、一律（対照区）

・1区面積 27m²（4.5m×6m）

・植生指数の取得方法 farmeyeはドローン（ファームアイ社）、GNDVIは生育情報測定装置（プリード社）を使用して4月13日（標播は開花始期、

晩播は出穂期に相当) に取得。

- ・収量の算出方法 植生指数ごとに収量予測モデル(令和2年度成績書参照)から算出
farmeye: 収量 = $1592 \times \text{farmeye} - 419$
GNDVI: 収量 = $4785 \times \text{GNDVI} - 1727$
- ・追肥量の算出方法 追肥量予測モデル(村田・金子 2021)から算出
追肥量 = $(4.1 \times 10^{-3} \times \text{収量} + \text{子実タンパク目標値} - 11.4) / 0.5$
子実タンパク目標値は 12.0%
- ・対照区の追肥量 窒素成分で 6.0kg/10a

エ. 調査項目

植生指数、収量、子実タンパク

3. 試験結果

表1に可変施肥を行った結果を示した。播種時期にかかわらず可変F区では収量を少なく予測しており、可変G区では高く予測していた。予測収量と実測収量の差の絶対値は可変F区の方が可変G区よりも大きく、可変F区では収量予測精度が低い可能性があった。予測収量から算出された追肥量は可変F区の方が可変G区よりも少なかった。子実タンパクは、標播では可変F区と可変G区ともに11.8%であり、目標値の12.0%に近かった。晩播では、可変F区の子実タンパクは12.4%で目標値に近く、可変G区は13.3%であり目標値を大きく上回った。つまり、可変F区では播種時期にかかわらず子実タンパクの目標値に近い値が得られたが、収量予測精度が低い可能性があること、可変G区では晩播において子実タンパクが過大であり、追肥量が過剰である可能性が示された。収量予測と子実タンパクの目標値を達成できたと考えられるのは標播の可変G区のみであった。

これらの結果を検証するために、追肥量が一律6.0kg/10aである対照区のデータを用いて、可変施肥に用いた2つのモデル(収量予測モデルと追肥量予測モデル)を検証した。

まず、収量予測モデルにおいて、植生指数(farmeyeとGNDVI)から予測した収量と実測収量の関係を図1に示した。farmeyeで予測した収量は、播種時期にかかわらず実測収量との1:1の直線の下側に分布した。つまり、farmeyeでは収量を過小評価していた。GNDVIで予測した収量は標播では1:1の直線付近に分布したが、晩播では直線の上側に分布しており、収量をやや過大評価する傾向にあった。RMSEを比較すると、播種時期にかかわらずGNDVIの方がfarmeyeよりも小さく、予測精度が高かった。つまり、farmeyeでは播種時期にかかわらず収量を過小評価し、誤差も大きいこと、GNDVIでは標播は誤差が小さいが、晩播では収量をやや過大評価することが示された。

次に、追肥量予測モデルにおいて、子実タンパクの実測値と収量(実測収量、farmeye予測収量、GNDVI予測収量)から算出した追肥量を図2に示した。データは図1と同様に対象区のものを用いた。対照区は開花期追肥を一律に6.0kg/10a施用したため、追肥量予測モデルで算出した追肥量が6.0kg/10aに近いほど誤差が小さいことになる。図2において、実測収量を用いて算出した追肥量は、標播では6.0kg/10aの周辺に分布したが、晩播では7.0kg/10a以上を中心に分布した。RMSEも標播と比べて晩播では非常に大きくなった(図3)。つまり、追肥量予測モデルは標播では誤差が小さかったが、晩播では誤差が大きかった。実測収量の代わりにfarmeye予測収量を用いた場合、播種時期にかかわらず実測収量の場合よりも追肥量は少なく算出された。そのため、標播では追肥量は過少となり6.0kg/10aを下回ったが、晩播では実測収量の場合よりも6.0kg/10aに近くなった。RMSEも実測収量の場合と比べて標播では大きかったが、晩播では小さかった(図3)。GNDVI予測収量を用いた場合、標播では実測収量の場合と同様に6.0kg/10aの周辺に分布したが、晩播では実測収量の場合よりも追肥量は多く算出された。RMSEは実測収量の場合と比べて標播では小さかったが、晩播では大きかった(図3)。

これらのことから、可変F区では播種時期にかかわらず収量予測精度が低いこと、晩播の可変G区において追肥量が過剰となったのは、収量予測モデルでの収量過大評価の上に追肥量予測モデルでの追肥量過大評価が加わって誤差が増大したためであることが明らかとなった。したがって、モデルの誤差が小さく、可変施肥が可能であるのは標播の可変G

区、すなわち適期播種した小麦を GNDVI でリモートセンシングする場合のみと考えられた。

4. 主要成果の具体的データ

表 1 対照区と可変施肥区の予測収量、実測収量、追肥窒素量、および子実タンパク

播種時期	試験区	予測収量 kg/10a	実測収量 kg/10a	差 kg/10a	追肥量 kg/10a	子実タンパク %
標播	対照	-	584	-	6.0	12.2
	可変 F	496	587	-91	5.5	11.8
	可変 G	635	572	+63	6.1	11.8
晩播	対照	-	458	-	6.0	13.2
	可変 F	342	457	-115	3.8	12.4
	可変 G	516	487	+29	5.2	13.3

各区 4 反復の平均値を示す。追肥量は窒素成分量を示す。

可変 F 区と可変 G 区はそれぞれ 4 月 13 日に取得した植生指数 farmeye と GNDVI を用いて予測収量と追肥量を算出した。予測収量と追肥量は反復ごとに算出した。

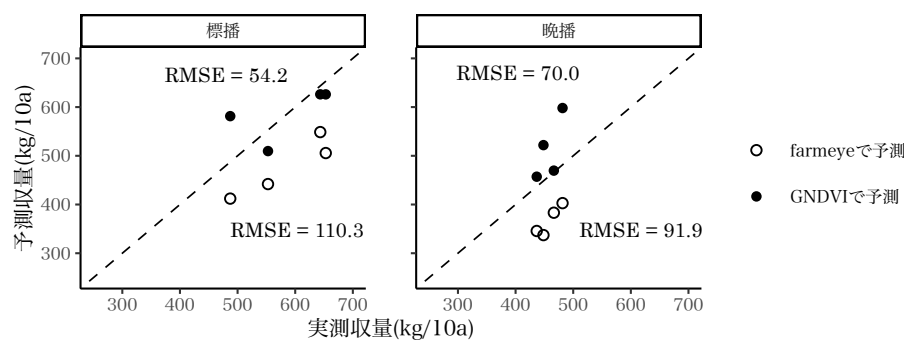


図 1 収量予測モデルで予測した収量と実測収量の関係

対照区（標播、晩播それぞれ 4 反復）を用いた。

点線は予測収量と実測収量の 1:1 の直線 ($y = x$) を示す。

RMSE の計算方法は図 3 の脚注に示した。

収量予測モデルは次のとおり。

$$\text{farmeye}; \text{収量} = 1592 \times \text{farmeye} - 419$$

$$\text{GNDVI}; \text{収量} = 4785 \times \text{GNDVI} - 1727$$

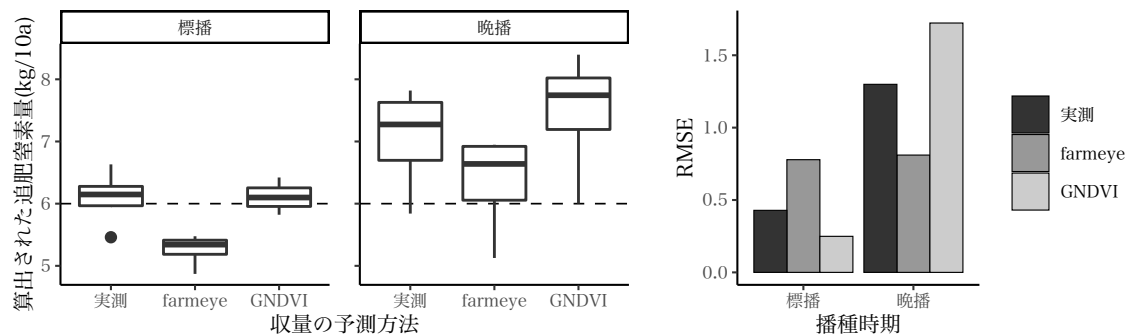


図 2 追肥量予測モデルで算出した追肥量

対照区において、図 1 で予測した収量を用いて追肥量予測モデルから追肥量を算出した。

点線は実際の追肥量 (6.0kg/10a) を示す。

追肥量予測モデルは次のとおり。

$$\text{追肥量} = (4.1 \times 10^{-3} \times \text{収量} + \text{子実タンパク目標値} - 11.4) / 0.5$$

図 3 追肥量予測モデルの RMSE

図 2 のデータを用いた。

RMSE は次の式で算出した。n はデータ数、 f は予測値、 y は実測値を示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}$$

5. 経営評価

可変施肥が有効であった標播可変 G 区において、追肥量は平均 6.1kg/10a であり、対照区の 6.0kg/10 と比べて肥料の削減効果はなかった (表 1)。したがって、可変施肥によってリモートセンシングの経費 (例; ファームアイの場合 1,650 円/10a) が生産費に加わ

ることとなり、生産費の削減にはつながらなかった。ただし、生産現場では小麦の生育が旺盛な場合には、開花期追肥を増量して8~10kg/10a施用している。このような場合であれば、可変施肥によって施肥量を削減できる可能性がある。

6. 利用機械評価

ドローンは上空から広範囲をセンシング可能であり、圃場に立ち入る必要がないため、生産現場でのセンシングに適している。今回は小区画の場内試験であり、作業能率等は調査しなかった。

7. 成果の普及

得られた成果は普及指導員等に情報提供する。

8. 考察

本研究では収量予測モデルと追肥量予測モデルを組み合わせることで、穂揃期頃のリモートセンシングで得られた植生指数 (farmeye と GNDVI) から追肥量を算出し、それを施用することで子実タンパクの安定化を可能とする可変施肥技術の有効性を検証した。その結果、farmeye を用いた場合、播種時期にかかわらず収量予測モデルの精度が低いこと、晩播では追肥量予測モデルの精度が低下し、追肥量が過剰に算出されることが明らかとなった。

収量予測モデルにおいては、farmeye を用いた場合は精度が低下した。これは farmeye と収量の関係には年次間変動があり、そもそも収量予測モデルの精度が高くないことが理由と考えられた (令和2年度成績書)。さらに、GNDVI および farmeye の収量予測モデルはいずれも適期播種した小麦の穂揃期のデータを用いて作成されており、リモートセンシング時期が出穂期に相当した晩播では精度が低下しやすかったと考えられた。追肥量予測モデルの精度が晩播で低下した理由は明らかではないが、開花期に追肥した窒素の利用効率が標播と晩播で異なる可能性が考えられた。

これらの点については、今後の改善が必要ではあるものの、適期播種した小麦を GNDVI でリモートセンシングする場合に限っては、モデルの誤差が少なく、可変施肥が可能であることが示された。ただし、本研究では可変施肥を行っても、慣行栽培と比べて追肥量は同等であり、生産費は削減できなかった。したがって経営的には可変施肥を導入しても収益は改善しない可能性がある。しかし、実需者との契約栽培が主体であるパン用小麦の生産拡大のためには、子実タンパクの安定化は極めて重要であり、開花期追肥の可変施肥技術はそのために有効な技術である。可変施肥技術の普及のためには、産地規模でのリモートセンシング機器の導入など、費用低減の取り組みが必要と考えられる。

9. 問題点と次年度の計画

晩播における収量予測モデルと追肥量予測モデルの精度向上が必要である。多様な条件で栽培された小麦についても可変施肥技術が有効であるか、現地試験等で検証する必要がある。

10. 参考写真



写真1 リモートセンシングの様子 (2021年4月13日撮影)



標播 (開花始期)



晩播 (出穂期)

写真2 リモートセンシング時の様子 (2021年4月13日撮影)



写真3 生育情報測定装置 (プリード社)