

委託試験成績（令和元年度）

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～令和3年度、新規
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29年産において1,000haを超え、さらに拡大している。生産面積の拡大の一方で、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。これまでの研究から、「せときらら」において開花期追肥窒素量を1kg/10a増やすごとに、子実タンパクは0.5ポイント増加することがわかっている。したがって、「せときらら」の収量と子実タンパクの関係を明らかにして、その収量を開花期までにリモートセンシングで予測できれば、子実タンパクの基準達成に必要な開花期追肥量を診断できると考えられる。平成30年度にファームアイ社のドローンで測定したNDVI（NDVI_farmeye）による予測を行った結果、「せときらら」において、穂肥に由来する収量の変動はNDVI_farmeyeで十分予測できるものの、遮光処理した場合には十分な精度で予測できなかった。この結果から、年次間で日射量の変動する場合には予測精度が低下する可能性があると考えられた。したがって、引き続き複数年のデータを蓄積する必要があると考えられた。さらに、NDVI_farmeye以外にも日射量の変動した場合でも安定的に予測が行える植生指数についても探索する必要がある。そこで本研究ではパン用小麦「せときらら」において、子実タンパクの基準値達成を可能とする追肥基準の策定を目的として、①年次間変動を含めた収量と子実タンパクの関係の解明並びに②NDVI_farmeye およびその他の植生指数による収量予測技術の開発を行う。</p>
担当者名	村田資治
	<p>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）</p> <p>2. 試験方法</p> <p>(1) 供試機械名 Inspire + RedEdge（ファームアイ社）</p> <p>(2) 耕種概要</p> <p>ア. 圃場条件 礫質灰色低地土（水稲跡）</p> <p>イ. 栽培等の概要</p> <p>品種名 小麦「せときらら」</p> <p>土壌改良 炭酸苦土石灰 100kg/10a</p> <p>耕起 ロータリー耕 2018年11月21日（標準播）、12月13日（晩播）</p> <p>施肥 基肥（N:P:K = 14:17:13） 播種時</p> <p>分けつ肥（N:P:K = 15:5:20） 2019年1月29日</p> <p>穂肥（N:P:K = 21:0:0） 2019年2月22日</p> <p>開花期追肥は行わなかった。</p> <p>施肥量 後述</p>

播種	畝立て同時施肥播種（畝幅 150cm、1 畝 4 条） 2018 年 11 月 21 日（標準播）、12 月 13 日（晩播）
除草	リベレーターフロアブル 80ml/100L/10a 播種と同日 ラウンドアップマックスロード 200ml/100L/10a 播種と同日 ハーモニー75DF 10g/100L/10a 2019 年 1 月 25 日 全て動噴散布
中耕培土	なし
病虫害防除	チルト乳剤 1000 倍、スミチオン乳剤 1000 倍 2019 年 4 月 16 日 シルバキュアフロアブル 2000 倍 2019 年 4 月 22 日

(3) 試験項目

2 つの試験を行った。試験 1 は分けつ肥と穂肥によって小麦の生育量を変化させる追肥試験（グラデーション圃場）とした。試験 1 において植生指数（NDVI_farmeye、GNDVI、NDVI、RVI、CI）と収量の関係を明らかにして、植生指数による収量予測モデルを作成する。試験 2 は追肥窒素ではなく播種時期と遮光率によって「せときらら」の生育量を変化させる遮光試験とした。試験 2 のデータを用いて試験 1 で作成した収量予測モデルの精度を検証し、植生指数ごとに播種時期や日射量の影響が予測モデルの精度に及ぼす影響を明らかにした。

ア. 追肥試験（グラデーション圃場）

- ・耕種概要 2. (2). イ参照。ただし、播種期は標準播のみ。
- ・施肥体系 基肥 (N:P:K = 14:17:13) 播種時 窒素 6 kg/10a
分けつ肥 (N:P:K = 21:0:0) 2019 年 1 月 29 日
穂肥 (N:P:K = 21:0:0) 2019 年 2 月 22 日
開花期追肥なし
- ・処理水準 分けつ肥 2 水準×穂肥 3 水準=6 水準、2 反復
- ・ (分けつ肥 窒素 0、2 kg/10a ; 穂肥 窒素 0、3、6 kg/10a)
- ・1 区面積 24m² (3m×8m)
- ・調査項目 植生指数、センシング時の SPAD 値(10 株分)、草丈(10 株分)、茎数(1.5m²)、収量と収量構成要素、子実タンパク質含有率

表 1 処理の内容

	施肥時期			合計
	基肥	分けつ肥	穂肥	
窒素施用量 (kg/ 10a)	6	0, 2	0, 3, 6	6, 9, 12, 8, 11, 14

イ. 遮光試験

- ・耕種概要 2. (2). イ参照。
- ・施肥体系 基肥 (N:P:K = 14:17:13) 播種時 窒素 6 kg/10a
分けつ肥 (N:P:K = 15:5:20) 2019 年 1 月 29 日 窒素 2 kg/10a
穂肥 (N:P:K = 21:0:0) 2019 年 2 月 22 日 窒素 6 kg/10a
開花期追肥なし
- ・処理水準 播種時期 2 水準×遮光率 2 水準=4 水準、4 反復
(播種時期：標準播と晩播、遮光率：0%と 50%)
- ・処理方法 遮光シートを 2019 年 3 月 1 日から 4 月 3 日まで小麦群落の上に設置
- ・1 区面積 24m² (3m×8m)
- ・調査項目 植生指数、センシング時の SPAD 値(10 株分)、草丈(10 株分)、茎数(1.5m²)、成熟期の収量と収量構成要素、子実タンパク質含有率

ウ. リモートセンシングによる植生指数の取得

リモートセンシングはドローン（ファームアイ社）と山口県農林総合技術センター所有の生育情報測定装置（プリード社）の2つで行った。生育情報測定装置は近赤外、赤色、緑色の反射率を測定可能である。これらの反射率からNDVI、GNDVI、RVI、CIを算出した。ドローンで測定した植生指数は以下、NDVI_farmeyeと表記した。センシングは2019年4月11日および4月18日に実施した。今回は4月11日に調査したデータを用いた。

3. 試験結果

追肥試験では穂肥によって穂数と収量が有意に増加した（表2）。穂数と収量には有意な正の関係があったが、回帰直線の決定係数は0.52であり、穂数以外の要素も増収に寄与したことが示唆された（図1）。一穂粒数と穂数にも有意な正の関係があり、決定係数は0.66だった（図2）。これらのことから、2019年産の小麦「せときらら」では穂肥の増加によって穂数と一穂粒数が増加したことで増収したと考えられた。

植生指数（NDVI_farmeye、NDVI、GNDVI、RVI、CI）およびSPAD値による収量予測が可能かどうか検討した。方法は次の通りとした。まず、追肥試験において各植生指数に対する収量の回帰直線を作成し、これを収量予測モデルとした。次に、このモデルを使って遮光試験で測定した植生指数から収量を予測した。予測精度の指標としてモデルによる予測値と実測値の誤差を示す平均平方二乗誤差（RMSE）を用いた。結果は次の通りだった。追肥試験における回帰直線はSPAD値を除くすべての植生指数において決定係数0.84以上（ $p < 0.1\%$ ）だった（図3）。この収量予測モデルの精度を遮光試験のデータで検証したところ、標準播ではすべての植生指数においてデータは回帰直線の周囲に分布しており（図3）、RMSEは50 g/m²以下と小さかった（図4）。しかし晩播では植生指数によって結果が異なった。GNDVIとCIでは晩播でも回帰直線の周囲にデータが分布しており（図3）、RMSEは61 g/m²以下だった（図4）。一方、NDVI_farmeye、NDVIおよびRVIでは回帰直線に対して晩播の収量が偏っており、モデルによって収量が過大あるいは過小評価されていた。その結果、NDVI_farmeye、NDVIおよびRVIでは晩播のRMSEが86 g/m²以上となり、標準播と比べて誤差が大幅に増加した（図4）。遮光の影響については、遮光によって顕著に予測誤差が大きくなることはなかった（データ略）。

植生指数と子実タンパクの関係について、追肥試験では収量が増加するほど子実タンパクも増加した（図5左）。遮光試験では収量と子実タンパクに有意な関係はなかった（図5右）。

4. 主要成果の具体的データ

表2 追肥試験（左）と遮光試験（右）における「せときらら」の収量と子実タンパク

分けつ肥 g m ⁻²	穂肥 g m ⁻²	倒伏程度 0-5	収量 g m ⁻²	子実タンパク %	播種時期	遮光率 %	倒伏程度 0-5	収量 g m ⁻²	子実タンパク %
0	0	0	472	8.8	標準播	0	0	660	9.9
0	3	0	538	9.1	標準播	50	2.3	569	11.5
0	6	0	627	9.4	晩播	0	0	557	9.3
2	0	0	538	8.7	晩播	50	0	529	9.7
2	3	0	597	8.9	分散分析	播種時期	-	**	***
2	6	0	636	9.1	分散分析	遮光率	-	*	***
分散分析	分けつ肥	-	ns	ns	分散分析	交互作用	-	ns	**
	穂肥	-	**	ns					
	交互作用	-	ns	ns					

***, **, *, ns:それぞれ0.1, 1, 5%水準で有意差あり、および有意差なし。以下同様。

倒伏程度はセンシング時（2019年4月11日）に調査。0（倒伏なし）から5（全面倒伏）の6段階で調査した。

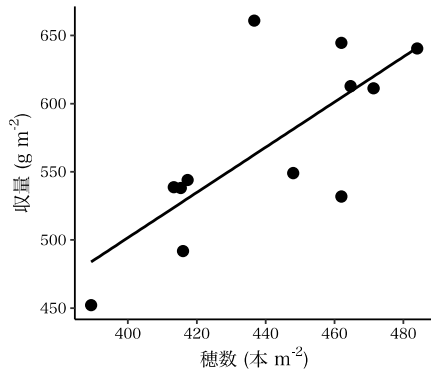


図 1 追肥試験における収量と穂数の関係。R² = 0.52, P < 0.01.

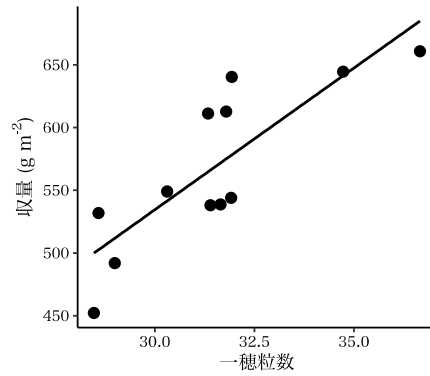


図 2 追肥試験における収量と一穂粒数の関係。R² = 0.66, P < 0.001.

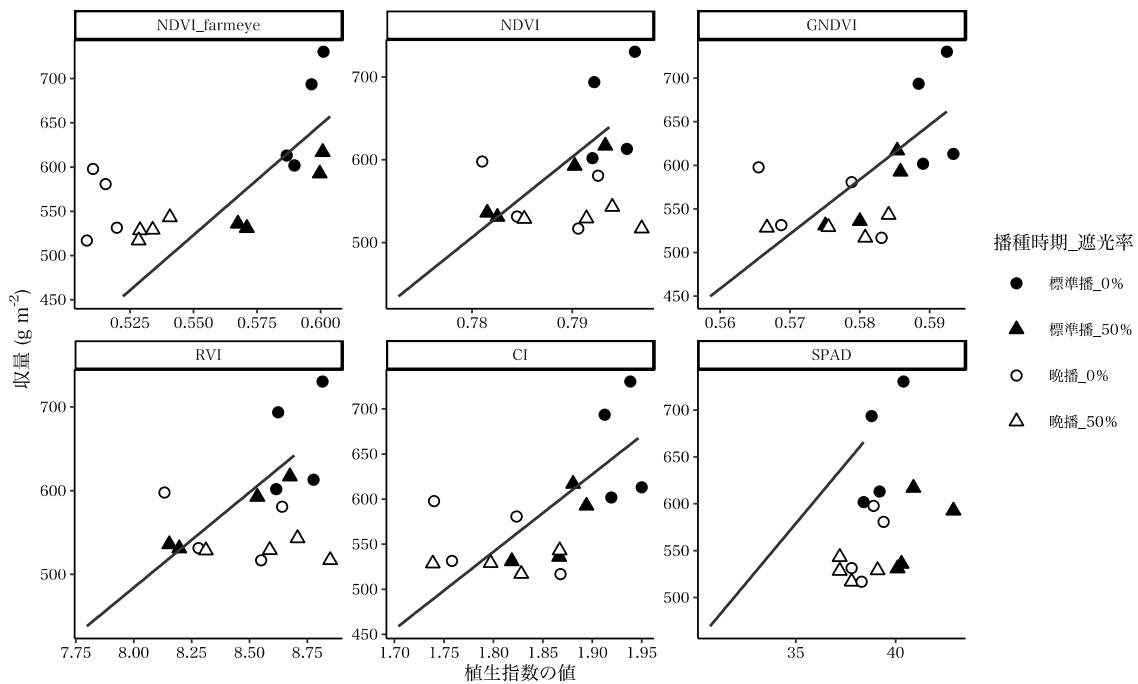


図 3 遮光試験における各植生指数と収量の関係

直線は追肥試験における各植生指数に対する収量の回帰直線を示す (p < 0.001)。追肥試験のデータは省略して回帰直線のみ示した。センシングは 2019 年 4 月 11 日に行った。

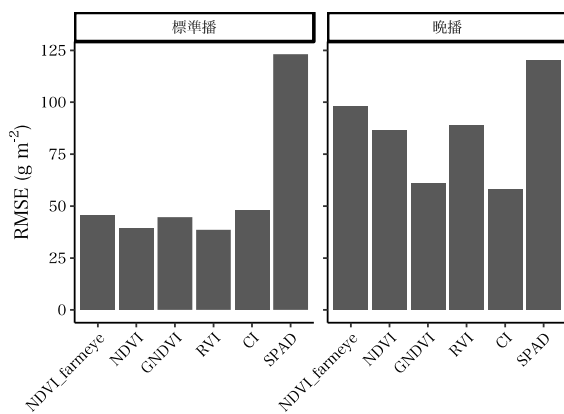


図 4 遮光試験における各植生指数から予測した収量の RMSE

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

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

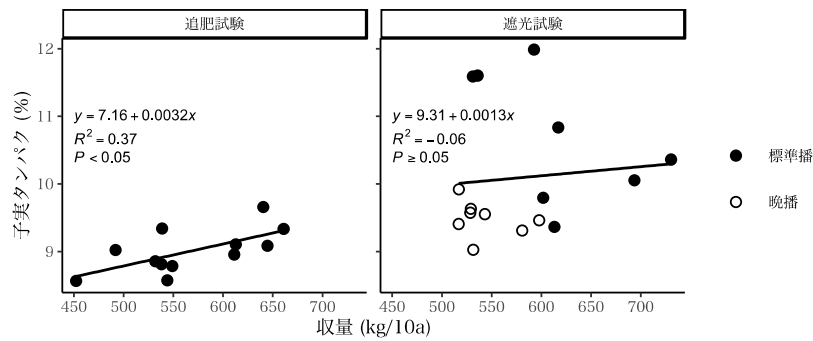


図5 追肥試験と遮光試験における収量と子実タンパクの関係

点は反復ごとに示した。直線は収量に対する子実タンパクの回帰直線を示す。遮光試験の回帰直線は播種時期を込みにして算出した。遮光試験では播種時期を説明変数に加えても有意ではなかった。

5. 経営評価

パン・中華麺用小麦は品質に応じてA-Dのランクに分けられ、ランクごとに交付金単価（数量払い）が異なる。ランク区分は子実タンパク、灰分、容積重、フォーリングナンバーの4項目のうち何項目において基準値あるいは許容値を達成したかで決定する。本研究で開発する技術によって安定的に子実タンパク向上が可能となると、ランク区分が1段階改善することが期待される。ランク区分の改善が収支に及ぼす影響を表3に示した。ランクBがAに改善されると交付金単価が500円/60kg増加するため、収支は916円/10a改善する。ランクC以下の場合には子実タンパクを向上させても収支は悪化する。したがって、本技術はランクB以上の小麦を栽培可能な地域に普及することが望ましい。

表3 「せときらら」のランク区分の改善が収支に及ぼす影響

子実タンパク向上による ランク区分の変化	収量 kg/10a	等級	交付金差額 円/60kg	センシング費 円/10a	肥料費差額 円/10a	収支 円/10a
B→A	374	1	500	1650	551	916
C→B	374	1	150	1650	551	-1266
D→C	374	1	60	1650	551	-1827

収量と等級は農林水産省「作況調査」の令和元年度「せときらら」の結果を参考にした。交付金差額は令和元年度畑作物の直接支払交付金における数量払い単価を元に算出した。肥料費差額は農林水産省「国内外における農業資材の供給の状況に関する調査」の平均価格を基に、子実タンパクを向上させるための開花期追肥として硫酸を窒素成分で2kg/10a増量したと仮定して算出した。

6. 利用機械評価

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、追肥試験において植生指数（NDVI_farmeye、NDVI、GNDVI、RVI、CI）およびSPAD値を用いて「せときらら」の収量予測モデルを作成し、遮光試験で得られた植生指数から収量が予測可能かどうか検討した。その結果、GNDVIとCIでは誤差61g/m²以下で収量を予測できたが、NDVI_farmeye、NDVIおよびRVIでは播種時期（標準播、晩播）が異なるコムギ群落の収量を予測する場合には精度が大幅に低下することが明らかとなった。本研究では2019年4月11日にセンシングを行ったが、この時点で標準播は穂揃期、晩播は穂ばらみ期だった。植生指数によってはセンシング時の出穂の有無が予測精度に影響すると考えられた。SPAD値については標準播でも晩播でも予測誤差が100g/m²以上であり、収量予測には不相当と考えられた。遮光の影響について

は、遮光によって顕著に予測誤差が大きくなることはなかった。

植生指数と子実タンパクの関係について、本研究では「せときらら」の子実タンパクは収量と負の関係があると仮定している。これは先行研究および現場での観察から妥当な仮定と考えられるが、本研究の結果は異なっていた。追肥試験では収量が増加するほど子実タンパクも増加した。追肥試験では分けつ肥と穂肥量に水準を設定したが、収量は穂肥によって増加した。穂肥を増やすと収量は増加するが子実タンパクは低下しないことが明らかにされている（水田ら 2019）。本研究の追肥試験において収量と子実タンパクに負の関係が見られなかったのは穂肥水準を変動させたためと考えられた。遮光試験では収量と子実タンパクに有意な関係はなかった。要因のひとつとして、収量および子実タンパクのばらつきに対して処理の水準数（播種時期 2 水準と遮光 2 水準の合計 4 水準）が少なく、収量と子実タンパクの関係を検出できなかった可能性が考えられた。これらの結果から、本研究で仮定した収量と子実タンパクの負の関係は穂肥量の変更では再現できないこと、遮光処理で再現するためには多数のデータが必要である可能性あることが示された。本委託試験で単年度に設定可能な処理および水準数には限りがある。引き続き複数年のデータを蓄積する必要がある。さらに今後は山口県農林総合技術センターで独自に実施してきたこれまでの「せときらら」の試験結果も加味して、収量と子実タンパクの関係を明らかにすることで、植生指数から開花期追肥量の算出を試みたい。

【引用】水田ら 2019. 穂肥重点施肥による多収パン用品種「せときらら」の高品質多収化. 日作紀. 88:98-107.

9. 問題点と次年度の計画

引き続き複数年のデータを蓄積するとともに、既存のデータから収量と子実タンパクの関係式を作成する。

10. 参考写真



写真1 ドローン
(ファームアイ社)



写真2 生育情報測定装置
(プリード社)



写真3 遮光シート撤去前の様子
(晩播、4月3日撮影)



写真4 センシング時の遮光試験圃場
(標準播、4月3日撮影)