

委託試験成績（令和2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、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、年次間変動を含めた①NDVI_farmeye およびその他の植生指数による収量予測モデルの開発および②収量と子実タンパクの関係の解明を行う。</p> <p>本研究は3年間の研究期間を予定しており、今年度は試験2年目である。基本的には初年目と同様の試験区と調査項目を設定してデータを取得する。2年間で得られたデータからNDVI_farmeyeおよびその他の植生指数による収量予測モデルが異なる年次で利用可能かどうか検討するとともに、収量と子実タンパクの関係の解明を行う。3年目では2年間のデータを利用して収量予測モデルを作成し、予測した収量に基づく可変施肥管理を行い、その有効性を検証する。</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

(1) 供試機械名 Inspire + RedEdge（ファームアイ社）

(2) 耕種概要

ア. 圃場条件 礫質灰色低地土（水稻跡）

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 2019年11月21日（標準播）、12月13日（晩播）

施肥 基肥（N:P:K = 14:17:13）播種時に窒素成分で6kg/10a施用

分けつ肥（N:P:K = 15:5:20）2020年1月21日

穂肥（N:P:K = 15:5:20）2020年2月20日

開花期追肥は行わなかった。

施肥量 後述

播種 畝立て同時施肥播種（畝幅150cm、1畝4条）

2019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 晩播のみ、播種と同日

ハーモニー75DF 10g/100L/10a 2020年1月21日

アクチノール乳剤200ml/100L/10a 2020年2月27日

中耕培土 なし

病害虫防除 シルバキュアフロアブル2000倍 2020年4月10日 標準播のみ

ワークアップフロアブル2000倍 2020年4月20日

シルバキュアフロアブル2000倍 2020年4月24日 晩播のみ

(3) 試験項目

令和元年度と同様に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とした。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1では植生指数（NDVI_farmeye、GNDVI、NDVI）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した。試験2では作成した収量予測モデルの精度を植生指数ごとに検証した。いずれの試験においても2年間（令和元年度～2年度）のデータを用いた。

ア. 試験1（追肥試験）

・耕種概要 2.(2).イ参照。ただし、播種期は標準播のみ。

分けつ肥と穂肥は硫安（N:P:K = 21:0:0）を使用。

・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）、収量と収量構成要素、子実タンパク質含有率

イ. 試験2（遮光試験）

・耕種概要 2.(2).イ参照。分けつ肥と穂肥はそれぞれ窒素成分で2kg/10a施用。

・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2020年3月6日から3月30日まで小麦群落の上に設置

・1区面積 24m²（3m×8m）

・調査項目 試験1と同じ

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マルチスペクトルカメラを搭載したドローン（ファームアイ社）と山口県農林総合技術センター所有の携帯型センサー（生育情報測定装置、プリード社）の2つで行った。携帯型センサーは近赤外、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 と GNDVI 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 2020 年 4 月 8 日と 4 月 15 日に実施した。なお、解析には 2019 年 4 月 11 日と 2020 年 4 月 8 日のデータを用いた。この時の生育ステージは標準播では穂揃期、晩播では穂ばらみ期であった。

3. 試験結果

令和元年度～2 年度の 2 年間のデータを用いて解析を行った。各年度において反復は平均した。

試験 1（追肥試験）における令和 2 年度の収量の範囲は 268～534kg/10a であった。令和元年度とあわせると収量の範囲は 268～636kg/10a であった（表 1）。

まず、携帯型センサーによる収量予測が可能かどうか検証した。試験 1 において 2 年間を込みにすると、収量と穂数には有意な直線関係があった（図 1）。決定係数は 0.85 であり、収量は穂数によって決定されていた。携帯型センサーで得られた植生指数と穂数の関係を調べた。2 年間を込みにして、穂数を携帯型センサーで取得した植生指数（GNDVI、NDVI）に回帰した。その結果、いずれの植生指数においても穂数との間に有意な回帰直線が得られた（図 2）。収量においても同様に、携帯型センサーで得られた植生指数と収量の間に有意な回帰直線が得られた（図 3）。つまり、開花期に携帯型センサーでセンシングすることによって、収量を推定できるといえた。この回帰直線（図 3）を収量予測モデルとした。試験 2（遮光試験）のデータを用いて収量予測モデルの精度を検証した。試験 2 における 2 年間を込みにした収量の範囲は 335～660kg/10a であり、ほぼ試験 1 と同様だった（表 2）。試験 2 の穂数と収量の関係を調べたところ、2 年間を込みにすると、穂数と収量には有意な直線関係があった（図 1）。決定係数は 0.99 であり、試験 2 においても収量は穂数によって決定されていた。作成した収量予測モデルを用いて、試験 2 の植生指数から収量を予測し（図 4）、誤差の大きさを評価した（図 5）。誤差の指標として平均平方根二乗誤差（RMSE）を使用した。予測精度は標準播と晩播で異なっており、晩播では精度が悪化した。標準播では RMSE は NDVI で 32、GNDVI で 29 であり、GNDVI の方が誤差が小さかった。一方、晩播では RMSE は NDVI で 44、GNDVI で 49 であり、GNDVI の方が誤差が大きかった。播種時期を込みにすると RMSE は NDVI で 38、GNDVI で 41 であり、NDVI の方が誤差が小さかった。しかし、その差はわずかであった。

次に、ドローンによって取得した植生指数（NDVI_farmeye）で収量予測が可能かどうか、携帯型センサーの場合と同様に検証した。試験 1 において、NDVI_farmeye に対する収量の有意な回帰直線が得られた（図 3）。しかし、NDVI_farmeye と収量の関係は年次間変動が大きく、回帰直線の決定係数は携帯型センサーの場合よりも低かった。この回帰直線を収量予測モデルとして、試験 2 の収量を予測した（図 4）。その結果、播種時期を込みにした場合の RMSE は 99 であり、誤差の大きさは携帯型センサーの 2 倍以上だった。NDVI_farmeye は同日に取得した SPAD 値と強い直線関係にあった（図 6）。

最後に、年度、試験 1 および試験 2 を込みにして子実タンパク質含有率と収量の関係を調べたところ、有意な相関関係は認められなかった（データ略）。

4. 主要成果の具体的データ

表 1 試験 1（追肥試験）における「せときらら」の収量と子実タンパク質含有率

分けつ肥 (kg/10a)	穂肥 (kg/10a)	収量 (kg/10a)		子実タンパク質含有率 (%)	
		令和元年	令和 2 年	令和元年	令和 2 年
0	0	472	268	8.8	9.0
0	3	538	423	9.0	8.8
0	6	627	499	9.4	8.8
2	0	538	324	8.7	9.3
2	3	597	448	8.9	9.2
2	6	636	534	9.1	9.1

令和元年度と令和 2 年度は、それぞれ 2018 年と 2019 年に播種した試験の結果を示す。以下同様。
倒伏程度はセンシング時（2019 年 4 月 11 日、2020 年 4 月 8 日）に調査したが、すべての処理区で倒伏はなかった。

表 2 試験 2 (遮光試験) における「せときらら」の倒伏程度、収量と子実タンパク質含有率

播種時期	遮光率	倒伏程度 (0-5)		収量 (kg/10a)		子実タンパク質含有率 (%)	
		令和元年	令和 2 年	令和元年	令和 2 年	令和元年	令和 2 年
標準播	0	0	0	660	424	9.9	9.3
標準播	50	2.3	0	569	410	11.5	9.9
晩播	0	0	0	557	336	9.3	9.3
晩播	50	0	0	529	335	9.6	9.2

倒伏程度はセンシング時 (2019 年 4 月 11 日、2020 年 4 月 8 日) に 0 (倒伏なし) から 5 (全面倒伏) の 6 段階で調査した。

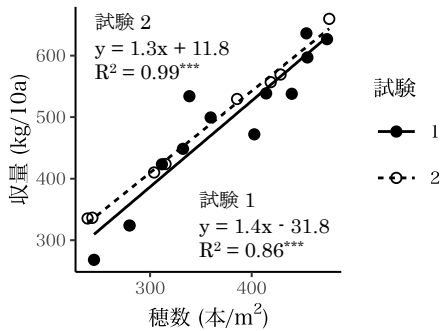


図 1 各試験における収量と穂数の関係直線は回帰直線を示す。***は 0.1%水準で有意であることを示す。

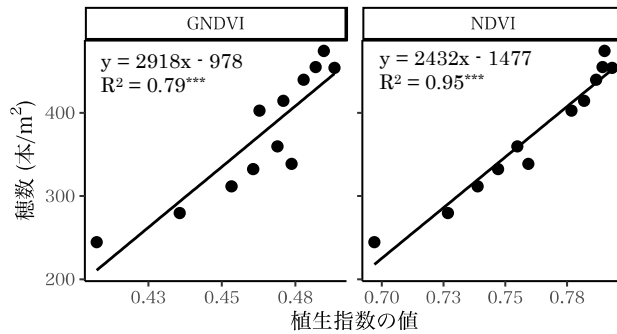


図 2 試験 1 における植生指数と穂数の関係直線は回帰直線を示す。***は 0.1%水準で有意であることを示す。

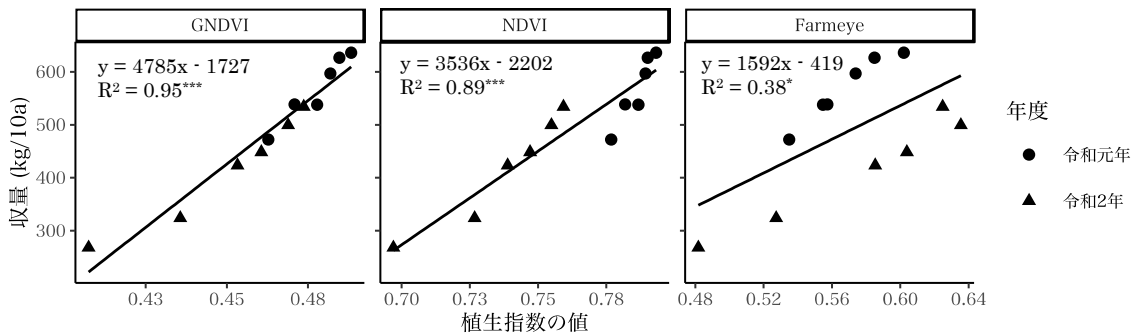


図 3 試験 1 における各植生指数と収量の関係直線は回帰直線を示す。回帰直線は 2 年間のデータを込みにして算出した。***、*はそれぞれ 0.1%、5%水準で有意であることを示す。Farmeye は NDVI_farmeye を示す。以下同様。

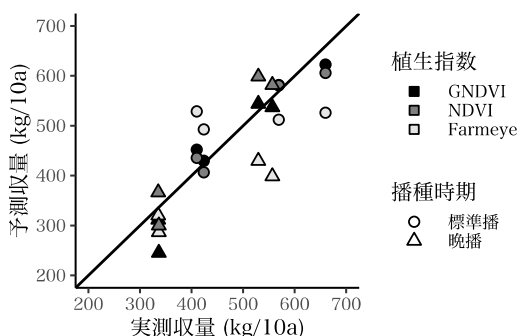


図 4 試験 2 における収量の予測値と実測値の関係直線は $y = x$ を示す。予測収量は植生指数ごとに試験 1 で作成した収量予測モデルから算出した。

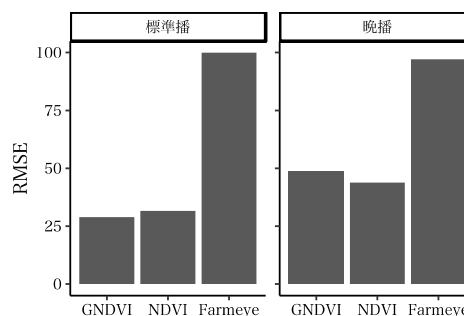


図 5 試験 2 における予測収量の RMSE RMSE は次の式で算出した。n はデータ数、 f_i は予測値、 y_i は実測値を示す。

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

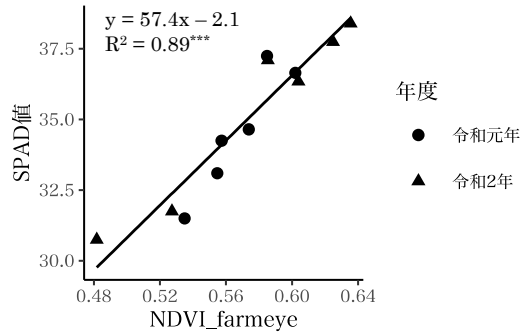


図 6 試験 1 における NDVI_farmeye と SPAD 値の関係
 直線は回帰直線を示す。回帰直線は 2 年間のデータを込みにして算出した。
 ***は 0.1%水準で有意であることを示す。

5. 経営評価

パン・中華麵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 1674 円/10a 改善する。したがって、センシング費用が 1674 円/10a 未満であれば経営的に技術の導入が可能である。一方、ランク C および D では技術の導入による経営的なメリットはほとんどない。ただし、パン用小麦は実需者との契約栽培が基本であり、実需者からは高タンパク化と安定化が強く求められている。技術導入によって生産者の経済的負担が増加する場合であっても、実需者の要望に応じて小麦栽培を継続するために、産地として技術を導入する可能性はあると考えられる。

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	交付金差額 円/60kg	肥料費差額 円/10a	収支 円/10a
B → A	267	500	551	1674
C → B	267	150	551	117
D → C	267	60	551	-284

収量は農林水産省「作況調査」の 10a 当たり平均収量を参考にした。

交付金差額は令和 2 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、硫安を窒素成分で 2kg/10a 増量したと仮定して算出した。

6. 利用機械評価

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

本研究では令和元年度～令和 2 年度の 2 年間、試験を行った。この 2 年間は気象条件が大きく異なったため、試験 1（追肥試験）において低収量（268kg/10a）から高収量（636kg/10a）まで、非常に多様な小麦群落を作出できた。この多様な小麦群落を調査対象としたことで、収量と穂数には直線関係があること、出穂期頃に携帯型センサーで取得した植生指数（GNDVI、NDVI）によっ

て穂数を介して収量を予測できることが明らかとなった。収量予測モデルは GNDVI の場合は $y=4785x-1727$ 、NDVI の場合は $y=3536x-2202$ であった。試験 2（遮光試験）でモデルの精度を検証したところ、(1) と (2) の予測精度はほとんど変わらなかった。ただし、どちらのモデルも標準播に比べて晩播の収量を予測する場合に精度が低下した。これはセンシング時の生育ステージの違いが原因と考えられた。センシング時には標準播は穂揃期だったが、晩播は穂ばらみ期だった。穂の有無が予測精度に影響した可能性があると考えられた。

次に、主に水稻の生育診断を行うために開発されたリモートセンシング用ドローン（ファームアイ社）を小麦の収量予測に利用できるか検討した。携帯型センサーの場合と同様に試験 1 で収量予測モデルを作成し、試験 2 で精度を検証した。その結果、収量予測モデルは作成できたものの、予測誤差は携帯型センサーの 2 倍以上高く、実用的な精度ではなかった。これは植生指数と収量との関係が年次によって大きく異なったことが原因と考えられた。ドローンで取得した植生指数は小麦の穂数よりも葉の SPAD 値との相関が高かった。この植生指数から直接収量を予測することはできないが、SPAD 値の代替値として生育診断等に利用できる可能性があると考えられた。

以上のことから、出穂期頃に小麦群落の GNDI または NDVI を取得することで収量予測が可能であることが明らかとなった。本研究の最終的な目的は開花期までに収量を予測し、収量に応じて可変追肥することで、子実タンパク質含有率（子実タンパク）を制御することである。そのためには収量予測モデルに加えて、収量から子実タンパクを予測するモデルが必要である。本研究では作成できなかったが、すでに別の研究において子実タンパク予測モデルを開発している（村田・金子 2021）。本研究で作成した収量予測モデルと組み合わせることで可変追肥による子実タンパク制御が可能となると考えられる。

【引用】村田・金子 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. 日作紀. 90:72-77.

9. 問題点と次年度の計画

収量予測に基づく可変施肥の有効性を検証する。本研究で作成した収量予測モデルと子実タンパク予測モデルを組み合わせることで、出穂期頃のセンシングによって子実タンパク質含有率の目標値を達成するための追肥量を算出する。実際にその量を追肥することで、子実タンパク質含有率が目標値を達成できるかどうか検証する。

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)