

リモートセンシングによる小麦品種「ハナマンテン」, 「さとのそら」の 追肥診断方法

丹野和幸*・荒川直也**

Remote Sensing Diagnosis of Topdressing for Wheat Varieties 'Hanamanten' and 'Satonosora'.

Kazuyuki TANNO and Naoya ARAKAWA

要 約 小麦品種「ハナマンテン」と「さとのそら」の省力的な追肥診断方法を開発するため、追肥施用前の正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, 以下, NDVI)が窒素追肥効果に与える影響を解析した。硬質小麦「ハナマンテン」は、各試験区の出穂期の NDVI を、基肥量、茎立期の追肥量、播種量、播種日を変えることで変化させた後、4 もしくは 8 gm^{-2} の窒素追肥を出穂期に施用した。窒素追肥量を 8 gm^{-2} とした場合と 4 gm^{-2} とした場合の 2 つの回帰式の差を推定することで、窒素追肥量の増加効果を評価した。その結果、「ハナマンテン」は出穂期追肥を慣行の 4 gm^{-2} から 8 gm^{-2} に増加させると、NDVI に関わらず子実タンパク質含有率が 2%上がった。中間質小麦「さとのそら」は、各試験区の茎立期の NDVI を、基肥量、播種量および播種日を変えることで変化させた。その後、窒素成分で 2~10 gm^{-2} 追肥した。その結果、窒素追肥量が多いほど、整粒重および子実タンパク質含有率が高くなるが、同時に倒伏も多くなった。したがって、最適な窒素追肥量は、複数の形質のバランスを考慮して決定することが望ましい。そこで、倒伏程度、容積重、子実タンパク質含有率を用いて補正した補正収量を解析した結果、最適な窒素追肥量は、NDVI が 0.8 のとき、約 4 gm^{-2} であった。「さとのそら」の分析方法は様々な栽培条件の最適値の推定に有用と考えられた。

小麦は、子実タンパク質含有率(以下、タンパク質含有率)が用途別に適正範囲にあることが求められる(農林水産省, 2024b)。出穂期前後の窒素追肥はタンパク質含有率を向上させる(島崎ら, 2015, 島崎ら, 2016)ため、埼玉県では高タンパク質が求められるパンや中華めん用の硬質小麦品種「ハナマンテン」は、茎立期に加えて出穂期頃の追肥を推奨している(農業支援課, 2013)。しかし、出穂期の窒素追肥量を生育に応じて調整する必要があるかは不明であった。また、日本めんや菓子用の中間質小麦

品種「さとのそら」は出穂 2 週間前の追肥を推奨しているが、茎立期以降は生長点が地上部にあり、大型機械の作業による損傷は避けられない。そのため、機械散布が困難な場合、茎立期直前の追肥を指導しており(農業支援課, 2013)、茎立期頃の生育に応じて追肥量を調節する技術が必要である。同様の技術は既に報告されているが(伴ら, 2018, 倉井ら, 1998)、手作業による形質計測が必要であり、広域での実施は困難と考えられる。

無人航空機(Unmanned aerial vehicle, 以下,

*水田高度利用担当(現大里農林振興センター), **水田高度利用担当

UAV)などによるリモートセンシングは，省力的かつ広域の診断が可能である．埼玉県では水稻品種「彩のかがやき」において，UAV の空撮画像から算出した正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, 以下，NDVI)を用いた移植後40～45 日頃実施する中間追肥の要否判断技術を開発した(埼玉県，2021)．この技術は現場からの関心が高く，「彩のかがやき」の中間追肥だけでなく，他の作型，品目や品種でも求められている．

そこで，本研究では，小麦品種「ハナマンテン」と「さとのそら」の省力的な追肥診断方法の開発のため，水稻で報告されている追肥診断方法(Tanno, 2021)を改良して小麦の解析に用い，最適な窒素追肥量を推定した．なお，本報告は「埼玉スマート農業研究開発事業「県の主要な水稻・麦品種のリモートセンシングによる生育障害監視技術の開発(2021～2023)」」による成果の一部である．

材料および方法

1 耕種概要

試験は，埼玉県農業技術研究センター玉井試験場水田(埼玉県熊谷市，北緯 36°169′，東経 139°353′，標高 35m，細粒灰色低地土・宝田統・埴壤土)において 2020 年冬～2023 年夏まで 4 圃場(圃場 I～IV とする)で実施した．品種は「ハナマンテン」と「さとのそら」を供試した．種子消毒はチウラム・ベノミル水和剤を乾燥種子重量の 0.5%粉衣処理とした．栽培概要は図 1 に，各試験区の面積や坪刈面積等の詳細な測定条件や施肥量および播種量等の栽培条件は，表 1 および表 2 に示した．追肥は，茎立期と出穂期に表層施用した．出穂期追肥は「ハナマンテン」のみ実施した．基肥は高度化成 14-14-14，茎立期追肥は硫安，出穂期追肥は塩安を施用した．耕耘，鎮圧後，播種深約 3 cm で播種し，播種後鎮圧を行った．病虫害・雑草防除は埼玉県麦類栽培基準(埼玉県，2014)に従った．

2 調査方法

収量調査は，周辺効果の影響を避けるため，各試験区の周縁部から少なくとも 50cm 間隔を取り地際刈りした．刈取面積は表 1，2 のとおりである．同

時期に倒伏程度(0～5；農業研究センター，1986)を測定した．成熟期に刈取り後，自然乾燥させ，脱穀，2.0 mm 目篩選などの調製作業を行い，整粒重，容積重を測定した．タンパク質含有率は近赤外分光分析装置(Infratec 1241, FOSS)を用いて分析した．水分含有率は穀物水分計(PB-1D3, Kett)を用いて測定し，整粒量，千粒重，容積重は水分含有率 12.5%換算値，タンパク質含有率は同 13.5%換算値を示した．

NDVI を求めるための画像取得は次のように行った．UAV(Matrice600Pro, DJI)にマルチスペクトルカメラ(Sequoia, Parrot)を搭載し，追肥施用日の当日の午前 8 時 30 分から午前 10 時の間に高度 100m から空撮した．撮影日はいずれも晴天または薄曇りの日であった．なお，空撮は自律飛行用アプリケーション(GS Pro, DJI)を用いて自動で行った．空撮画像の解析は，SfM(Structure from Motion)ソフトウェア(Metashape, Agisoft)を用いて空撮画像を合成したオルソモザイク画像を作成し，刈取り地点付近の NDVI の平均値を取得した．NDVI の計算式は以下のとおりである．なお，NIR と RED はそれぞれ波長 790nm, 660nm の分光反射率を示し，計算には観測した輝度値をそのまま用いた．

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

3 統計解析

統計解析は，R for windows4.1.2 と Stan を用いた．Tanno(2021)を参考に，NDVI が追肥量に与える影響をマルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo methods, 以下 MCMC)により得た事後分布からベイズ推定により評価した．MCMC サンプリングの設定は seed = 1234, chain = 5, iteration = 10000, warmup = 1000, thin = 3 とした．

Y は応答変数，FID は異なる播種日や圃場番号のデータを区別するための通し番号，TOPDh は「ハナマンテン」の出穂期追肥の窒素施用量 (gm^{-2})，NDVI は追肥直前の NDVI の平均値である．「ハナマンテン」の解析には，以下のモデルを用いた．

$$Y[n] \sim \text{normal}(\mu[n], \sigma)$$

$$\mu[n] = \text{random}[FID[n]] + \beta_0 + \text{モデル } i$$

$\text{random}[f] \sim \text{normal}(0, \sigma_{\text{random}})$

パラメータ β_x は各説明変数の係数, σ_Y は応答変数の標準偏差, σ_{random} は切片に対する変量効果の標準偏差を示す. 各パラメータの事前分布は, 非情報事前分布 (Normal (0,100)) とした. モデル i の部分は以下の 9 つのモデルについて, 各応答変数の広く使える情報量基準 (Widely Applicable Information Criterion, WAIC) が最も低いモデルを適用した.

モデル 1 = $\beta_1 * \text{NDVI}[n] + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \text{NDVI}[n] * \text{TOPDh}[n]$

モデル 2 = $\beta_1 * \text{NDVI}[n] + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \log(\text{NDVI}[n]) * \text{TOPDh}[n]$

モデル 3 = $\beta_1 * \text{NDVI}[n] + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * (\text{NDVI}[n])^2 * \text{TOPDh}[n]$

モデル 4 = $\beta_1 * \log(\text{NDVI}[n]) + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \log(\text{NDVI}[n]) * \text{TOPDh}[n]$

モデル 5 = $\beta_1 * (\text{NDVI}[n])^2 + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * (\text{NDVI}[n])^2 * \text{TOPDh}[n]$

モデル 6 = $\beta_1 * \log(\text{NDVI}[n]) + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \text{NDVI}[n] * \text{TOPDh}[n]$

モデル 7 = $\beta_1 * (\text{NDVI}[n])^2 + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \text{NDVI}[n] * \text{TOPDh}[n]$

モデル 8 = $\beta_1 * \log(\text{NDVI}[n]) + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * (\text{NDVI}[n])^2 * \text{TOPDh}[n]$

モデル 9 = $\beta_1 * (\text{NDVI}[n])^2 + \beta_2 * \text{TOPDh}[n] + \beta_3 * \log(\text{NDVI}[n]) * \text{TOPDh}[n]$.

応答変数の事後分布について, TOPDh が 8 gm^{-2} 場合と 4 gm^{-2} の場合で比較した.

「ハナマンテン」の出穂期追肥の解析目的は, 追肥量を慣行から増やす要否の 2 値判断であり, 4 gm^{-2} と 8 gm^{-2} の差の評価で達成できる. 一方, 「さとのそら」の茎立期追肥の解析目的は連続量から最適追肥量を見つけることであり, 先述の手法は適用できない. さらに, 生育中期の茎立期頃の追肥は, 生育後半の出穂期追肥よりも整粒重や子実タンパク質含有率など多くの形質に影響を与える(望月ら, 2016). 加えて, 施用直前の NDVI も追肥の効果に影響すると考えられる. したがって, 茎立期の最適追肥量は, 複数の形質のバランスを考慮して決定しなければならない. そのため, 「さとのそら」の解析では, 整粒重を倒伏程度, 容積重, タンパク質含

有率で補正した補正収量を応答変数とした. この補正は, 経営所得安定対策で支払われる直接支払交付金の交付単価に影響するランク区分(農林水産省, 2024a)を基に仮定した. 具体的には, 補正収量 $Y = (\text{整粒重}) * (1 - \text{倒伏程度}/5) * (\text{タンパク質補正}) * (\text{容積重補正})$ である. タンパク質補正は, タンパク質含有率が 8.5 %未満または 12.5 %を超える場合は 0.8, 9.7~11.3 %の場合は 1.2, それ以外は 1 とした. 容積重補正は, 840 g/L 未満の場合は 0.8, それ以外は 1 とした. TOPDj は, 「さとのそら」の茎立期における追肥窒素量(gm^{-2})である. 解析には以下のモデルを用いた.

$Y[n] \sim \text{normal}(\mu[n], \sigma_Y)$

$\mu[n] = \text{random}[FID[n]] + \beta_0 + \beta_1 * (\text{NDVI}[n] * \text{TOPDj}[n] - \beta_2)^2$

$\text{random}[f] \sim \text{Normal}(0, \sigma_{\text{random}})$

パラメータ β_x は各説明変数の係数, σ_Y は応答変数の標準偏差, σ_{random} は切片に対する変量効果の標準偏差を示す. 各パラメータの事前分布は, 無情報的事前分布(Normal (0,100))とした. 補正収量は, NDVI と TOPDj を説明変数とする上に凸の二次方程式で回帰し, 頂点座標の NDVI による変化, すなわち補正収量が最大となる最適 TOPDj(=最適窒素追肥量)を解析した. 事後分布から, NDVI の変化に伴う最適 TOPDj($=\beta_2/\text{NDVI}$)の変化を図示した.

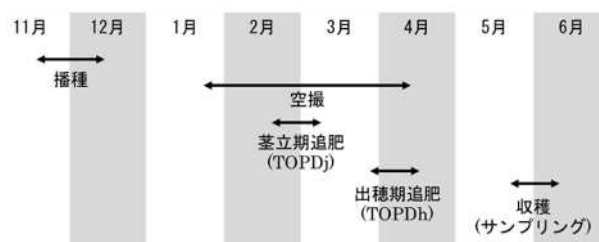


図 1 本試験における小麦の栽培概要

a)小麦品種「ハナマンテン」は出穂期追肥(TOPDh)の効果を評価した.
小麦品種「さとのそら」は茎立期追肥(TOPDj)の効果を評価した.

表 1 「ハナマンテン」の試験区構成と出穂期

圃場 番号	試験区面積 (m ²)	刈取面積 (m ²)	播種日	出穂期	播種量 (gm ²)	窒素施用量(gm ⁻²)			図の 記号 ^{c)}
						基肥	茎立期追肥	出穂期追肥	
I	42	3.3	2020 年 11 月 13 日	2021 年 4 月 4 日	6	6	2	4, 6, 8	○
I	42	3.3	2020 年 11 月 25 日	2021 年 4 月 7 日	8	6	2	4, 6, 8	△
II	12	2.64	2021 年 11 月 17 日	2022 年 4 月 13 日	8	0	0, 2, 4, 6	4, 8	+
III	5.3	1.2	2022 年 11 月 16 日	2023 年 4 月 4 日	11	2, 4, 6, 8	0, 1, 2, 3	4, 8	×

a)試験区ごとに窒素施用量の組み合わせは異なる。

b)条間は全て 30cm とした。

c)図 3 の点ごとの栽培条件を示す記号。

表 2 「さとのそら」の試験区構成と茎立期

圃場 番号	試験区面積 (m ²)	刈取面積 (m ²)	播種日	茎立期	播種量 (gm ²)	条間 (cm)	窒素施用量(gm ⁻²)		図の 記号 ^{b)}
							基肥	茎立期追肥	
II	12	2.64	2021 年 11 月 17 日	2022 年 3 月 15 日	8	30	3, 6, 9, 12	4, 7, 10	○
II	12	2.64	2021 年 12 月 2 日	2022 年 3 月 23 日	6	30	3, 6, 9, 12	4, 7, 10	△
II	12	2.64	2021 年 12 月 2 日	2022 年 3 月 23 日	6	15	4, 10	4, 7, 10	+
III	8.4	3.3	2022 年 11 月 7 日	2023 年 3 月 8 日	12	30	0, 2, 4, 8	2, 4, 6, 8	×
IV	33.6	3.3	2022 年 11 月 22 日	2023 年 3 月 13 日	6	30	4, 6, 8	2, 4, 6	◇
IV	33.6	3.3	2022 年 12 月 15 日	2023 年 3 月 21 日	8	30	4, 6, 8	2, 4, 6	▽

a)試験区ごとに窒素施用量の組み合わせは異なる。

b)図 4, 5 の点ごとの栽培条件を示す記号。

結果

1 小麦品種「ハナマンテン」の NDVI と出穂期追肥の解析

出穂期追肥を慣行の 4gm⁻² から増やす必要性を追肥直前の NDVI から判断するため、追肥直前の NDVI と出穂期追肥の増量効果の関係を解析した。この時期の NDVI は約 0.63~0.87(図 2 A)であった。

整粒重、タンパク質含有率は出穂期の NDVI が増加するにつれて増加し(図 3A, C), 容積重は減少する傾向であった(図 3D)。出穂期の NDVI や追肥量と倒伏程度の間に明瞭な関係は認められなかった(図 3B)。出穂期追肥の 4 gm⁻²から 8 gm⁻²の増量は、整粒重、倒伏程度、容積重にほぼ影響を与えなかったが、NDVI に関わらずタンパク質含有率を約 2% 増加させた(図 3C)。出穂期の NDVI が 0.75~0.8 のとき、追肥量 8gm⁻² で実需が求めるパン・中華めん用のタンパク質含有率である 13%~14% (農林水産省, 2024)を達成した区が複数あった(図 3C)。

2 小麦品種「さとのそら」の NDVI と茎立期追肥の解析

茎立期直前の NDVI は 0.37~0.80(図 2B)であった。茎立期追肥の増量は、整粒重、倒伏程度、タンパク質含有率を増加させる傾向があった(図 4A~C)。整粒重を倒伏程度、容積重、タンパク質含有率で補

正した補正収量を、NDVI と TOPDj を説明変数とする上に凸の二次方程式で回帰し、頂点座標の NDVI による変化、すなわち補正収量が最大となる TOPDj(=最適窒素追肥量)を解析した。その結果、補正収量が最大値となる NDVI と TOPDj の積は約 3 であった(図 5A)。最適窒素追肥量は、3 を NDVI で割った商とし、その値は NDVI の増加に伴い減少し、NDVI が 0.4, 0.8 のときはそれぞれ約 8gm⁻², 約 4gm⁻²となった(図 5B)。また、茎立期 1 週間前の NDVI に基づく分析でも、ほぼ同じ結果が得られた(データ省略)。

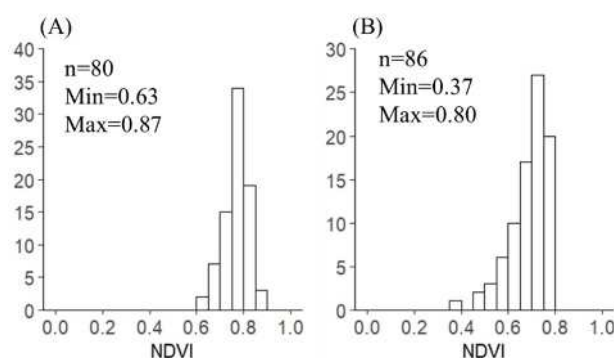


図 2 (A)「ハナマンテン」の出穂期頃の NDVI と(B)「さとのそら」の茎立期頃の NDVI
a)n はデータ数, Min と Max は各品種で得られた数値の最小値と最大値を示す。

考察

1 NDVI による「ハナマンテン」への出穂期追肥増量の

可否診断

本試験の結果、出穂期追肥を 4 gm^{-2} 増量しても、整粒重、倒伏程度、容積重にはほとんど影響せず(図 3A, B, D)、タンパク質含有率は約 2%増加した(図 3C)。高山ら(2004)は、開花後に吸収された窒素の大部分は穀粒に移行し、出穂から 10 日後に窒素を追肥すると、子実タンパク質含有率は増加するが、節間伸長や倒伏にはほとんど影響しないと報告している。このことは本研究の結果と概ね一致した。生育末期に吸収された窒素の多くが子実に移行する(Cassman *et al.*, 1992)ことは多くの報告があるが、本研究では、子実タンパク質含有率に対する NDVI と出穂期追肥の増量との間にほとんど交互作用が見られなかった(図 3C)。つまり、出穂期追肥の 4 gm^{-2} 増量によるタンパク質含有率の増加程度は出穂期の NDVI とほぼ無関係であると推察される。回帰式の 50%ベイズ予測区間は、NDVI が約 0.85~0.9 で 13%に届いた。 8 gm^{-2} の出穂期追肥をしても、タンパク質含有率 13~14%を達成することは困難だが、一部の試験区では NDVI が概ね 0.75~0.8 のとき、 8 gm^{-2} の出穂期追肥により、タンパク質含有率 13%~14%を達成した(図 3C)。一方、NDVI が概ね 0.75 より低い場合、出穂期追肥 8 gm^{-2} でもタンパク質含有率は 13%を上回った試験区はほぼ無く、茎立期追肥などにより出穂期の NDVI を 0.75~0.8 に制御する必要があると示唆された。

タンパク質含有率は百分率であるため、窒素吸収量に関して収量を考慮しなければならない。子実タンパク質の増加率が同じと仮定すると、収量が多い場合は窒素吸収量が多くなる。すなわち、NDVI が高い場合、収量が高くなる傾向があり(図 3A 左, 中央)、タンパク質含有率の増加も同様であることから(図 3C 左, 中央)、NDVI が高いほど、窒素吸収が多いと解釈できる。これは、NDVI が高いほど収量が高く、窒素を受け入れる子実の容量も大きいためと考えられる。本知見から、硬質小麦の出穂期追肥に関しては、生育が劣る地点により多く追肥すべきだという増収を目的とした一般的な追肥とは異なる考え方が必要であることが示唆された。

2 NDVI による「さとのそら」への茎立期の最適追肥量の診断

Tanno(2021)および「ハナマンテン」の分析では、追肥の効果は、追肥の有無、または追肥量が多い場合と少ない場合の 2 つの回帰式の差をとることで表現した。しかし、「さとのそら」は、茎立期追肥の増量により増収と同時に倒伏程度も増加させる(図 4A, B)ことが、先行研究でも同様に報告があり(Mizuta *et al.*, 2020)、茎立期追肥の有無や施肥量増加の有無といった離散的な判断ではなく、連続的な施肥量から最適施肥量を決定する必要があった。

そこで、複数の形質を考慮した補正収量を応答変数として、上に凸の 2 次方程式で回帰し、その頂点座標の変化を NDVI で解析することで、最適施肥量を推定した。具体的には、図 5A の回帰式より補正収量が最大となる茎立期と窒素追肥量の積は約 3 であり、この積を NDVI で割った商が最適な追肥量である。この関係を図 5B に示した。茎立期の最適追肥量は NDVI によって変化した。慣行の施肥量は約 4 gm^{-2} であり、NDVI が 0.8 のときの最適追肥量の推定値と一致した(図 5B)。手動測定による生育に基づく茎立期追肥量の調整(伴ら, 2018, 倉井ら, 1998)や NDVI による小麦の生育の推定(Samborski *et al.*, 2015)はすでに報告されているが、NDVI に基づき具体的な施肥量を設定した報告はほとんどない。

この解析方法により、様々な作物に対する生育に応じた最適追肥量の推定が可能となった。それだけでなく、肥料以外の様々な栽培要素の基準作りに利用できる点で有用な解析手法である。今後は、本解析と DVR モデル(Kawakita *et al.*, 2020)を組み合わせ、空撮時の麦の発育ステージを推定し、それに応じて適用するモデルを変更することで、生育診断の精度を向上させることができると考えられる。

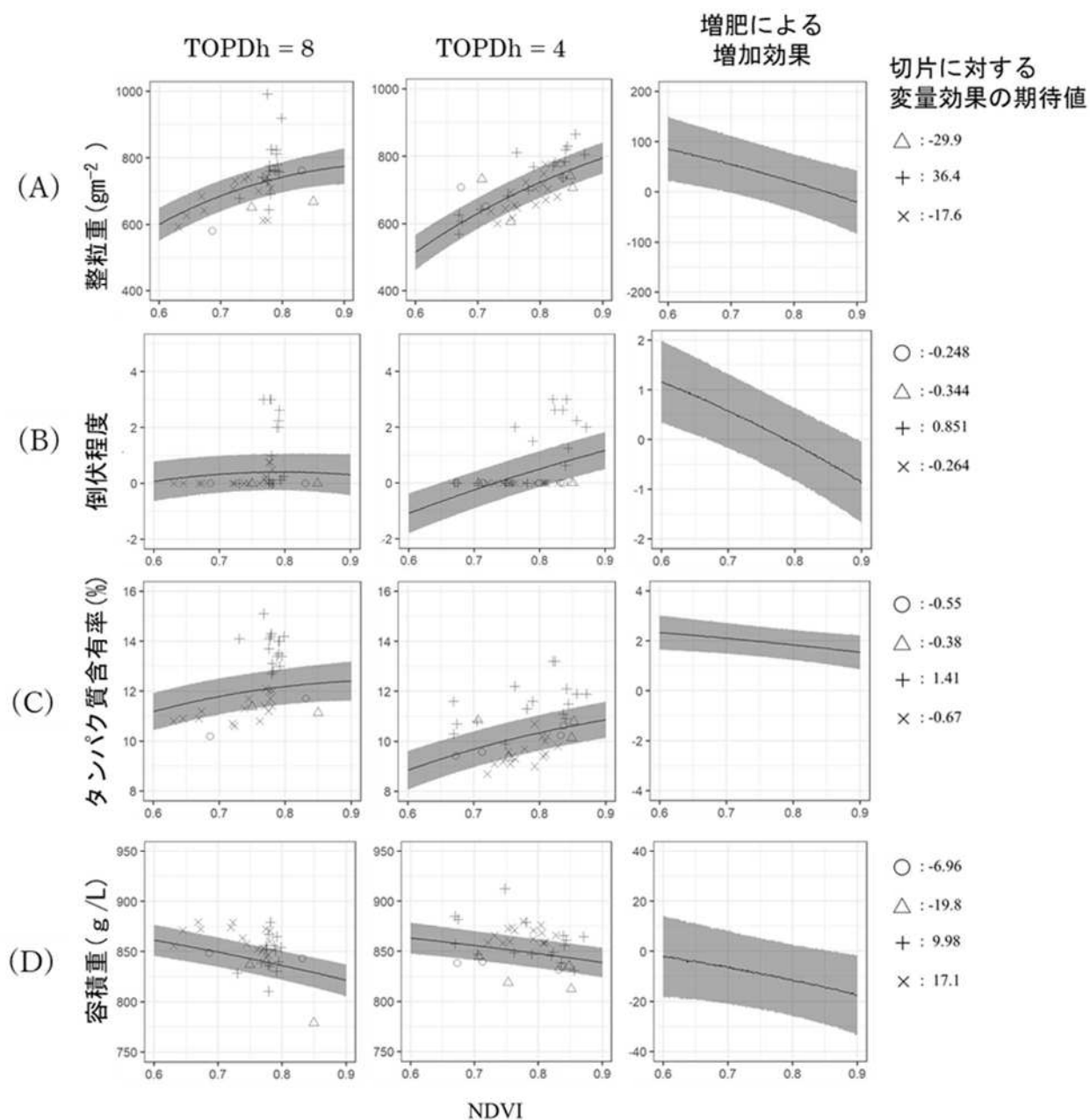


図3 「ハナマンテン」の収量・品質関連形質に対する出穂期追肥の増施とNDVIの影響

a)図の左側は出穂期追肥窒素量が 8gm^{-2} の場合，中央は出穂期追肥窒素量が 4gm^{-2} の場合，右側はその差，すなわち増肥による増加効果を示す．実線は事後分布の中央値，網掛部は50%ベイズ予測区間を示す．異なる播種日や圃場ごとの変量効果を異なる記号で示し(表1参照)，切片に対する変量効果の期待値を右側に示した(図5も同様)．

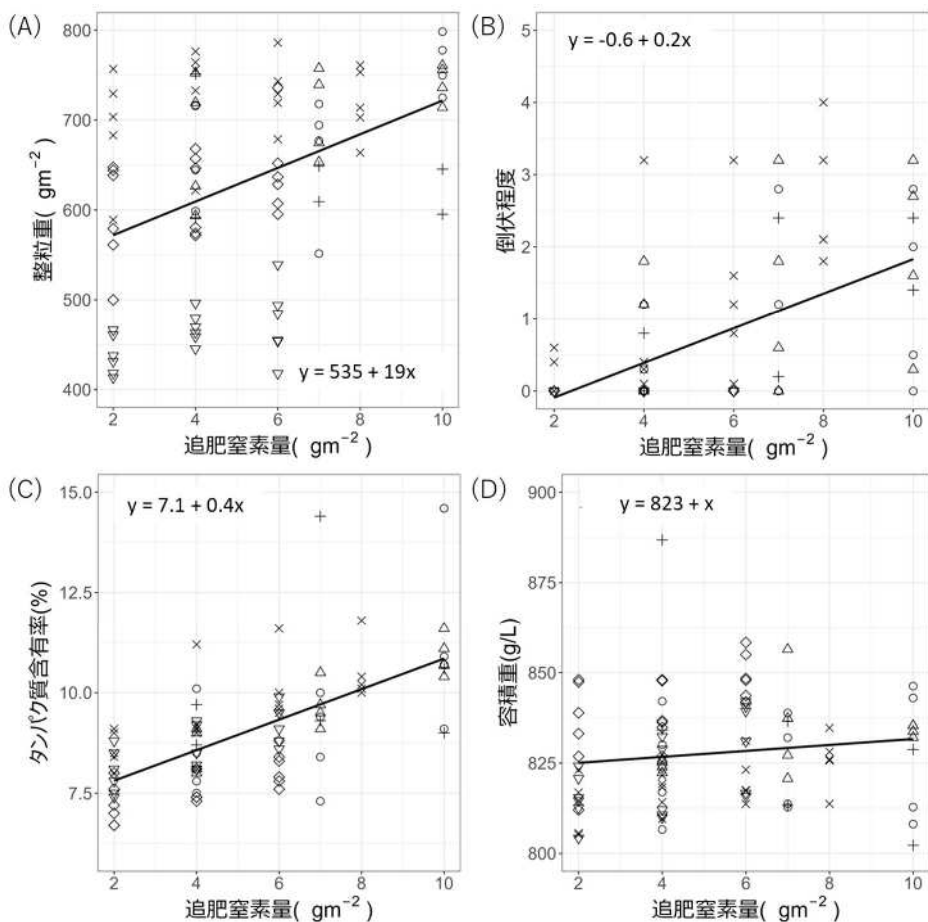


図4 茎立期追肥窒素量と「さとのそら」の収量・品質関連形質の関係
a)播種日や圃場ごとに異なる記号で示した(表2参照).
b)実線は各形質の回帰直線を示した.

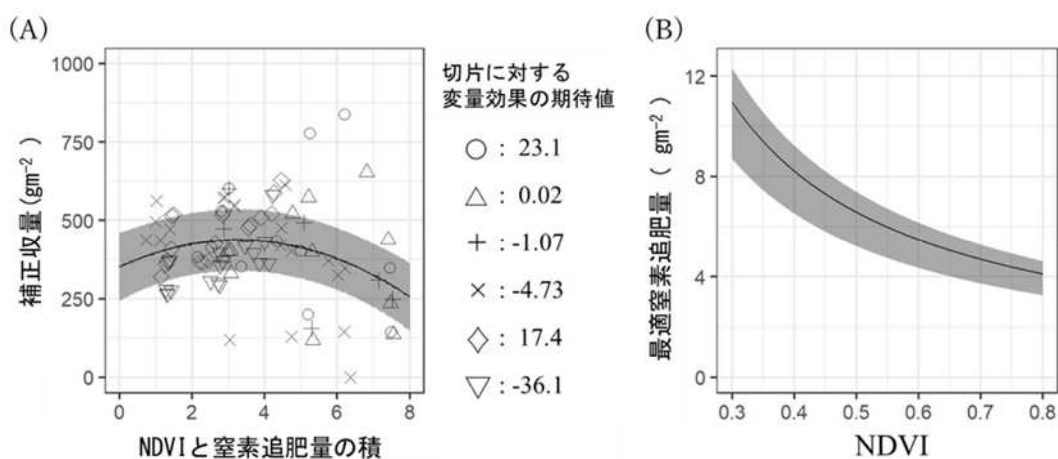


図5 「さとのそら」の茎立期の最適追肥量の推定
a)播種日や圃場ごとに異なる記号で示した(表2参照).

引用文献

- 伴 佳典・吉田 朋史・船生 岳人・坂 紀邦・加藤 恭宏・加藤 満・野々山 利博(2018)：小麦品種「きぬあかり」の生育状況に応じた追肥窒素量診断法の開発．日作紀講演会要旨集 245：33.
- Cassman K.G., Bryant D.C., Fulton A.E. and Jackson L.F.(1992)：Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat. *Crop Science* 32, 1251-1258.
- Kawakita S., Ishikawa N., Takahashi H., Okuno R. and Takahashi T. (2020)：Winter wheat phenological development model with a vernalization function using sigmoidal and exponential functions. *Journal of Agricultural Meteorology* 76, 81-88.
- 倉井耕一・木村守・遠山明子(1998)：小麦の追肥による生育パターンの変化と追肥技術への応用．栃木農試研報 47, 1-12.
- Mizuta K., Araki H. and Takahashi T. (2020)：Shifting timing of intensive nitrogen topdressing later to the stem-elongation phase reduced lower internodes length and lodging risk of wheat. *Plant Production Science* 23, 427-435.
- 望月篤・宇賀神七タ子・鶴岡康夫(2016)：千葉県の転換畑における追肥窒素の施用方法が小麦品種「さとのそら」の収量，外観品質，子実タンパク質含有率に及ぼす影響．千葉農林総研研報 8：59-67.
- 農業研究センター(1986)：小麦調査基準.
- 農林水産省 (2024a)：平成 18 年 8 月 7 日農林水産省告示第 1110 号（農業の担い手に対する経営安定のための交付金に関する法律施行規則第 3 条第 3 号の農林水産大臣が定める事項等を定める件）令和 6 年 3 月 29 日最終改正.
- 農林水産省 (2024b)：麦の生産をめぐる事情.
https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/mugi_kanren-180.pdf. (2024-10-15 閲覧).
- 埼玉県農林部農業支援課(2013)：主要農作物施肥基準.
- 埼玉県 (2014)：埼玉県麦類栽培基準.
- 埼玉県 (2021)：ドローンを用いた「彩のかがやき」の追肥診断.
<https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/70308/20210323drone.pdf>. (2024-3-26 閲覧).
- Samborski S.M., Gozdowski D.W., O. S., Lamb, D. W., Stepień M., Gacek E. S. and Drzazga T. (2015)：Winter wheat genotype effect on canopy reflectance: implications for using NDVI for in-season nitrogen topdressing recommendations. *Agronomy Journal* 107, 2097-2106.
- 島崎由美・赤坂舞子・渡邊好昭・大下泰生・松山宏美・平沢正(2015)：コムギの開花期地上部窒素蓄積量は子実タンパク質含有率と開花期窒素追肥の子実タンパク質含有率向上効果に影響する．日作紀 84：140-149.
- 島崎由美・渡邊好昭・関昌子・松山宏美・平沢正 (2016)：窒素の開花期追肥が水田で栽培されたコムギの製パン性に及ぼす影響．日作紀 85：294-301. <https://doi.org/10.1626/jcs.85.294>.
- 高山敏之・長嶺敬・石川直幸・田谷省三(2004)：コムギにおける出穂 10 日後追肥の効果 日作紀 73：157-162.
- Tanno K. (2021)：Analysis of changes in topdressing application effect on rice by NDVI using hierarchical Bayesian model. *Agronomy Journal* 113, 3434-3443.