

# リモートセンシングによる水稻品種「コシヒカリ」，「彩のかがやき」 の穂肥診断方法

荒川直也\*・丹野和幸\*\*

## Remote Sensing Diagnosis of Topdressing at Panicle Formation Stage for Rice Varieties ‘Koshihikari’, ‘Sainokagayaki’

Naoya ARAKAWA and Kazuyuki TANNO

**要 約** 埼玉県的主要な水稻品種「コシヒカリ」と「彩のかがやき」のリモートセンシングによる省力的な穂肥診断方法の開発を目的に，様々な栽培条件下における穂肥直前の正規化植生指数(Normalized Difference Vegetation Index，以下，NDVI)と穂肥効果の関係を解析した．その結果，「コシヒカリ」の穂肥に関して，施用時期(出穂前 18～26 日頃)の NDVI が低いほど増収効果は高かった．増収効果の得られる NDVI は移植時期によって異なるが，その値は，出穂前 20 日間の日最高気温と日最低気温の平均値を用いて推定可能と示唆された．具体的には，28℃の場合、NDVI が 0.67 を下回る場合，窒素成分で 2.5 gm<sup>2</sup>施用すると増収効果が得られると考えられた．「彩のかがやき」は NDVI が 0.67～0.76 のとき，窒素成分で 3 gm<sup>2</sup>施用により増収効果がみられた．一方，穂肥による白未熟粒の低減効果は両品種とも小さく，NDVI と穂肥施用効果の交互作用もほとんどみられなかったため，追肥時期や追肥回数などの検討が必要と考えられた．

近年，担い手の減少・高齢化により大規模経営体に農地集積が進み，労働力不足が深刻な問題となっているため，1 人当たりの作業面積の限界を打破する技術革新が必要である．水稻栽培では，田植機やコンバインの導入に伴い，田植や収穫作業の時間は大きく減少した(農林水産省，2024b)．一方，生育診断は葉色板や葉緑素計による基準が設けられているが(古川ら，2022，埼玉県，2024b)，労働力に限りがあるなかで，圃場ごとの実施は困難である．また，近年の温暖化によって水稻の登熟期間が高温となり，出穂後 20 日間の平均気温が 27℃以上で多発する白未熟粒(森田，2005)が，埼玉県内では大きな問題(埼玉県，2023，埼玉県，2024c)となっている．

高温障害対策の観点から生育診断に基づく追肥が重要である．

無人航空機(Unmanned aerial vehicle，以下，UAV)等によるリモートセンシングは従来の葉色板や葉緑素計による診断に比べ，省力的かつ広域の診断が可能である．埼玉県は「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数(Normalized Difference Vegetation Index，以下，NDVI)を用いた移植後 40～45 日頃の追肥(以下，中間追肥)の要否診断技術を開発した(埼玉県，2021)．しかし，診断技術の対象が水稻品種「彩のかがやき」の中間追肥のみであるため活用場面が限られる．

\*水田高度利用担当，\*\*水田高度利用担当(現大里農林振興センター)

埼玉県の 2023 年産水稻品種別作付割合は「彩のかがやき」が 30.3%, 「コシヒカリ」が 29.6%と 2 品種で約 60%を占める(埼玉県, 2024a)。そのため, 「彩のかがやき」の他時期の追肥や「コシヒカリ」の診断を検討する必要があると考えられた。生産現場では, 基肥に肥効調節型肥料を施用し追肥を省略する一発肥料体系が 2012 年産水稻において全国で 4 割程度普及している(農林水産省, 2016)。しかし, 埼玉県(2024b)は高温対策技術として, 一発肥料体系であっても穂肥施用時期の葉色に応じて穂肥を実施するよう指導しており, 診断の必要性が高いと考えられた。

そこで本研究では, 水稻品種「コシヒカリ」と「彩のかがやき」の省力的な穂肥診断方法の開発に向け, 栽植密度や基肥を変えて穂肥施用時期の生育を変化させ, リモートセンシングにより取得した施用時期の NDVI と穂肥の関係を検討した。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)にて 2021~2023 年に約 220~250 m<sup>2</sup>の 3 圃場(圃場 I ~ III とする)で実施した。試験圃場の栽培歴は, 2023

年の「彩のかがやき」の前作にオオムギを栽培したことを除き, 冬期は休閑とした。品種は「コシヒカリ」と「彩のかがやき」を供試した。種子消毒はイプコナゾール・銅水和剤 200 倍希釈液および MEP 乳剤 1,000 倍希釈液の 24 時間浸漬処理とした。移植日は, 「コシヒカリ」が 2021 年 4 月 28 日, 2021 年 5 月 12 日, 2022 年 5 月 11 日, 2023 年 5 月 10 日, 「彩のかがやき」が 2021 年 5 月 12 日, 2021 年 6 月 9 日, 2022 年 6 月 8 日, 2023 年 6 月 9 日とした。移植 2 日前に入水, 代かきを実施した。水管理および病害虫・雑草防除は埼玉県水稻栽培基準(埼玉県, 2007)に従った。

気象データは, 熊谷地方気象台の観測値を用いた。

### 2 試験区の設置

2 品種とも移植時期, 栽植密度, 基肥肥料の銘柄, 基肥量, 穂肥窒素量を要因として組み合わせ, 各圃場反復を設けずに試験区を設置した(表 1, 2)。各試験区の面積は, 圃場 I と圃場 II は 31.2 m<sup>2</sup> (8.9m×3.5m), 圃場 III は 27.7 m<sup>2</sup> (7.9m×3.5m)とした。栽植密度は, 2021 年は坪当たり 50 株のみ, 2022 年と 2023 年は坪当たり 37 株~60 株の範囲で田植機の設定により変更した。基肥は, 2021 年は高度化成 14 - 14 - 14 または, 速効性のアンモニア態窒素と緩効性肥料としてシグモイド型被覆尿素 90 日タイプと 100 日タイプを 8.3:2.85:2.85 の比で混合した市販の一発肥料 A(N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O : M<sub>2</sub>O = 14 : 15 : 15 : 2)を使用した。2022 年と 2023 年は一発肥料 A のみ使用した。基肥の施用は全区とも代かき直前に行った。なお, 代かきは試験区間の水の移動による肥料成分の流出を抑えるために波板で

表 1 「コシヒカリ」の試験区構成

| 圃場番号 | 移植日             | 栽植密度<br>(株/坪) | 基肥銘柄                  | 穂肥施用日<br>(出穂前日数)    | 窒素施用量(gm <sup>-2</sup> ) |        |
|------|-----------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|--------|
|      |                 |               |                       |                     | 基肥                       | 穂肥     |
| I    | 2021 年 4 月 28 日 | 50            | 一発肥料 A, 高度化成 14-14-14 | 2021 年 7 月 5 日(21)  | 3, 6                     | 0, 2.5 |
| II   | 2021 年 5 月 12 日 | 50            | 一発肥料 A                | 2021 年 7 月 12 日(21) | 3, 6                     | 0, 2.5 |
| I    | 2022 年 5 月 11 日 | 37, 60        | 一発肥料 A                | 2022 年 7 月 4 日(26)  | 2, 8                     | 0, 2.5 |
| II   | 2022 年 5 月 11 日 | 42, 50        | 一発肥料 A                | 2022 年 7 月 4 日(26)  | 3, 6                     | 0, 2.5 |
| I    | 2023 年 5 月 10 日 | 37, 50        | 一発肥料 A                | 2023 年 7 月 10 日(18) | 2, 8                     | 0, 2.5 |
| II   | 2023 年 5 月 10 日 | 42, 60        | 一発肥料 A                | 2023 年 7 月 10 日(18) | 3, 6                     | 0, 2.5 |

a) 試験区ごとに栽植密度, 窒素施用量の組み合わせは異なる。

表 2 「彩のかがやき」の試験区構成

| 圃場番号 | 移植日             | 栽植密度<br>(株/坪) | 基肥銘柄                  | 穂肥施用日<br>(出穂前日数)    | 窒素施用量(gm <sup>-2</sup> ) |      |
|------|-----------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|------|
|      |                 |               |                       |                     | 基肥                       | 穂肥   |
| II   | 2021 年 5 月 12 日 | 50            | 一発肥料 A                | 2021 年 7 月 20 日(22) | 3, 6                     | 0, 3 |
| III  | 2021 年 6 月 9 日  | 50            | 一発肥料 A, 高度化成 14-14-14 | 2021 年 7 月 26 日(25) | 3, 6                     | 0, 3 |
| III  | 2022 年 6 月 8 日  | 37, 60        | 一発肥料 A                | 2022 年 7 月 27 日(26) | 2, 8                     | 0, 3 |
| III  | 2023 年 6 月 9 日  | 37, 60        | 一発肥料 A                | 2023 年 7 月 26 日(24) | 2, 8                     | 0, 3 |

a) 試験区ごとに栽植密度, 窒素施用量の組み合わせは異なる。

区切った状態で実施した。穂肥は，3 か年とも硫酸を一時落水後表層施用した。穂肥施用日は表 1，2 に示した。

### 3 調査方法

収量調査は，2021 年は各試験区 2.64 m<sup>2</sup> (1.2m×2.2m)，2022 年と 2023 年は各試験区 3.3 m<sup>2</sup> (1.5m×2.2m)を地際刈りし，自然乾燥させた後，脱穀，粃すり等の調製作業を行い，精玄米重を求めた。玄米外觀品質は，穀粒判別器(RGQI20A，サタケ)を用いて収量調査後の収穫物のうち 1,000 粒の精玄米を調査した。白未熟粒数は穀粒判別器における乳白粒数，基部未熟粒数，腹白粒数の合計値とした。精玄米のタンパク質含有率は近赤外分光分析装置(2021 年は FOSS 社 Infratec 1241，2022 年と 2023 年は FOSS 社 Infratec NOVA)により測定した。なお，精玄米は篩目 1.8mm で選別した篩上の玄米とした。水分含有率は穀物水分計(PB-1D3，Kett)を用いて測定し，精玄米重，タンパク質含有率は水分含有率 15%の換算値で示した。

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，穂肥施用日の午前 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り，これ以降特に断りがなければ穂肥施用時期の NDVI を NDVI と記述する。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。

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

### 4 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 が穂肥の効果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 の設定は Seed=123, chain=4, iter=20,000, warmup=10,000, thin=1 とした。推定に用いたモデル式は以下のとおりであり，変量効果を含んだ重回帰分析である。モデル式の変数を表 3 に示した。Y1～3 は応答変数として精玄米重と白未熟粒数，タンパク質含有率であり，NDVI は NDVI の平均値，TOPD は穂肥の有無を示すダミー変数(TOPD=0：無施用，TOPD=1：施用)，NDVI \* TOPD は NDVI と穂肥の有無の交互作用とし，SEASON は変量効果として異なる移植日を示す通し番号である。 $\beta_x$ は各説明変数の係数， $\sigma_Y$ は応答変数の標準偏差， $\sigma_{random1}$  は切片に対する変量効果の標準偏差， $\sigma_{random2}$  は交互作用に対する変量効果の標準偏差を示す。つまり，切片および NDVI と穂肥の有無の交互作用は移植時期によりそれぞれ異なると仮定した。

$$Y_{1,3}[n] \sim \text{Normal}(\mu[n], \sigma_Y)$$

$$\mu[n] = \beta_0 + \text{random}_1[\text{SEASON}[n]] + \beta_1 * \text{NDVI}[n] + \beta_2 * \text{TOPD}[n] + (\beta_3 + \text{random}_2[\text{SEASON}[n]]) * \text{NDVI}[n] * \text{TOPD}[n]$$

$$\text{random}_1[\text{SEASON}] \sim \text{Normal}(0, \sigma_{\text{random1}})$$

$$\text{random}_2[\text{SEASON}] \sim \text{Normal}(0, \sigma_{\text{random2}})$$

表 3 推定したモデルの変数

| 応答変数                                                      | 説明変数(変量効果)                    | 説明変数の補足                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y1：収量関連形質<br>Y2：玄米外觀品質<br>(1,000 粒中の白未熟粒数)<br>Y3：タンパク質含有率 | NDVI：穂肥施用時期の NDVI             |                                                                                                                                                                                                      |
|                                                           | TOPD：穂肥の有無                    | 穂肥有=1，穂肥無=0 としたダミー変数                                                                                                                                                                                 |
|                                                           | NDVI * TOPD：NDVI と TOPD の交互作用 |                                                                                                                                                                                                      |
|                                                           | SEASON：移植日の変量効果               | 異なる移植日を示す通し番号。「コシヒカリ」において，1：2021 年 4 月 28 日移植，2：2021 年 5 月 12 日移植，3：2022 年 5 月 11 日移植，4：2023 年 5 月 10 日移植，「彩のかがやき」において，1：2021 年 5 月 12 日移植，2：2021 年 6 月 9 日移植，3：2022 年 6 月 8 日移植，4：2023 年 6 月 9 日移植。 |

品質について、1,000 粒中の白未熟粒数を応答変数(Y2)とするモデル式とした。

$$Y2[n] \sim \text{Binomial}(1000, q[n])$$

$$q[n] = \text{inv\_logit}(\beta_0 + \text{random}_1[\text{SEASON}[n]] + \beta_1 * \text{NDVI}[n] + \beta_2 * \text{TOPD}[n] + (\beta_3 + \text{random}_2[\text{SEASON}[n]]) * \text{NDVI} * \text{TOPD})$$

$$\text{random}_1[\text{SEASON}] \sim \text{Normal}(0, \sigma_{\text{random}_1})$$

$$\text{random}_2[\text{SEASON}] \sim \text{Normal}(0, \sigma_{\text{random}_2})$$

どちらのモデル式もパラメータの事前分布は無情報事前分布として一様分布を設定した。なお、inv\_logit はロジット変換を示す。

例えば、「コシヒカリ」の 2021 年 4 月 28 日移植の収量に与える穂肥の効果  $Y1_{\text{穂肥効果}}[n]$  は以下の式のとおりである。

TOPD=0 のとき、

$$Y1_{\text{穂肥無}}[n] \sim \text{Normal}(\mu_{\text{穂肥無}}[n], \sigma_Y),$$

$$\mu_{\text{穂肥無}}[n] = \beta_0 + \text{random}_1[1] + \beta_1 * \text{NDVI}$$

TOPD=1 のとき、

$$Y1_{\text{穂肥有}}[n] \sim \text{Normal}(\mu_{\text{穂肥有}}[n], \sigma_Y),$$

$$\mu_{\text{穂肥有}}[n] = \beta_0 + \text{random}_1[1] + \beta_1 * \text{NDVI} + \beta_2 + (\beta_3 + \text{random}_2[1]) * \text{NDVI}$$

$$Y1_{\text{穂肥効果}}[n] = Y1_{\text{穂肥有}}[n] - Y1_{\text{穂肥無}}[n] = \beta_2 + (\beta_3 + \text{random}_2[1]) * \text{NDVI}$$

つまり、TOPD=1 のとき、TOPD=0 の式に比べて NDVI 非依存的な穂肥効果を表す  $\beta_2$  と、移植日ごとに異なる NDVI 依存的な穂肥効果を表す  $(\beta_3 + \text{random}_2[1]) * \text{NDVI}$  が加わっている。

「コシヒカリ」の気象条件に応じた穂肥診断基準を策定するため、推定後の重回帰式から計算した増収効果が 0 である穂肥効果の予測分布の第一四分位数(50%ベイズ予測区間の下限)の NDVI 値(以下、交点の NDVI 値)を応答変数、出穂前 20 日間の日最高気温と日最低気温の平均値(以下、最高・最低気温の平均)または日平均気温を説明変数とする単回帰分析を行った。

## 結 果

### 1 気象

水稻生育期間中の半旬別平均気温の推移を図 1 に示した。2021 年は、7 月第 1 半旬、8 月第 3 半旬、

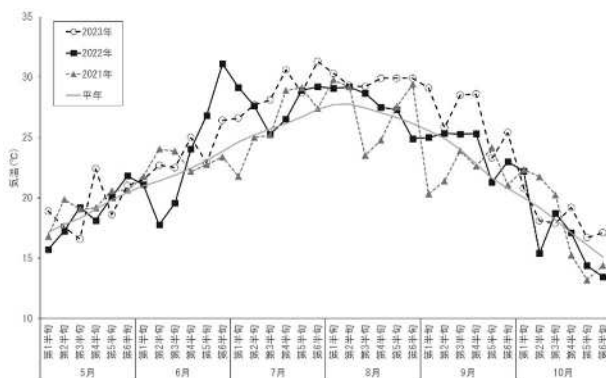


図 1 試験期間の半旬日平均気温  
a)熊谷気象台の観測値。

表 4 各移植期の出穂前後 20 日間の平均気温

| 品種     | 年    | 移植期      | 出穂期      | 平均気温(°C)       |                |
|--------|------|----------|----------|----------------|----------------|
|        |      |          |          | 出穂前<br>20 日間   | 出穂後<br>20 日間   |
| コシヒカリ  | 2021 | 4 月 28 日 | 7 月 26 日 | 27.1<br>(1.1)  | 27.4<br>(-0.2) |
|        | 2021 | 5 月 12 日 | 8 月 2 日  | 28.0<br>(1.3)  | 26.7<br>(-0.7) |
|        | 2022 | 5 月 11 日 | 7 月 30 日 | 27.4<br>(1.0)  | 28.9<br>(1.3)  |
|        | 2023 | 5 月 10 日 | 7 月 28 日 | 29.1<br>(3.0)  | 29.8<br>(2.2)  |
| 彩のかがやき | 2021 | 5 月 12 日 | 8 月 11 日 | 28.8<br>(1.3)  | 26.3<br>(-0.4) |
|        | 2021 | 6 月 9 日  | 8 月 20 日 | 26.8<br>(-0.7) | 24.9<br>(-1.0) |
|        | 2022 | 6 月 8 日  | 8 月 22 日 | 28.4<br>(0.9)  | 25.4<br>(-0.3) |
|        | 2023 | 6 月 9 日  | 8 月 19 日 | 29.8<br>(2.2)  | 29.0<br>(3.0)  |

a)0 内の数値は、平均気温は平年値との差を示す。

b)熊谷地方気象台の観測値。

第 4 半旬、9 月第 1 半旬、第 2 半旬が平年を下回ったことを除いて、概ね平年並から高く推移した。2022 年は、6 月第 2 半旬、第 3 半旬、10 月第 2 半旬を除いて、平年並から高く推移し、特に 6 月第 6 半旬は平年より 7.2℃高かった。2023 年は 6 月第 5 半旬から 9 月第 5 半旬まで生育期間を通じて平年に比べ高温傾向で推移した。

穂肥施用時期から出穂期までの幼穂発育期にあたる出穂前 20 日間と登熟歩合や玄米外観品質に重要な出穂後 20 日間の平均気温を表 4 に示した。「コシヒカリ」の出穂前 20 日間の平均気温は 3 か年とも平年より 1.0℃以上高かった。出穂後 20 日間の平均気温は 2022 年と 2023 年が平年より高かった。

「彩のかがやき」の出穂前 20 日間の平均気温は 2021 年 5 月 12 日移植と 2023 年が平年より 1.3℃以上高かった。出穂後 20 日間の平均気温は 2023 年が平年より 3.0℃高かった。

## 2 穂肥施用時期の NDVI が穂肥の効果に与える影響

### (1) コシヒカリ

得られた NDVI の範囲は 0.60～0.77 であった(図 2A)。精玄米重とタンパク質含有率は、穂肥の有無に関わらず、NDVI が増加するにつれて増える傾向であった(図 3A1, A2, C1, C2)。穂肥による増収効果は固定効果のみだと NDVI が 0.65 以下でみられた(図 3A3)。穂肥による増加効果の予測区間と x 軸との交点は移植日で異なった(表 5)。穂肥によるタンパク質含有率上昇効果は、移植日にほぼ関わらず、NDVI が約 0.65 以上でみられた(図 3C3, 表 5)。

白未熟粒数は、NDVI より移植日の影響が大きかった(図 3B1, B2)。穂肥による白未熟粒の低減効果は、固定効果のみだと NDVI が 0.70 以上でみられたが、最大でも NDVI が 0.77 のとき、固定効果の 50%予測区間が 32～76 とその効果は低水準だった(図 3B3, 表 5)。倒伏は全区発生しなかった。増収を目的とした追肥基準設定のため、気温と NDVI 値の単回帰分析をした結果、説明変数が最高・最低気温の平均のとき、日平均気温と比較して決定係数に大きな差はなく、0.928 と高かった(図 5)。図 5B の回帰式より、出穂前 20 日間の最高・最低気温の平均が 28℃の場合、NDVI が 0.67 以下であれば増収効果が得られると算出された。最高・最低気温の平均が高いほど交点の NDVI 値は高かった(図 5B)。

### (2) 彩のかがやき

得られた NDVI の範囲は 0.67～0.76 であった(図 2B)。精玄米重とタンパク質含有率は、NDVI と正の相関傾向がみられた(図 4A1, A2, C1, C2)。穂

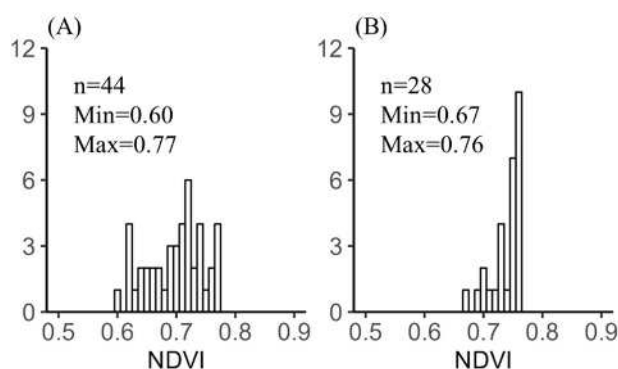


図 2 (A)「コシヒカリ」と(B)「彩のかがやき」の穂肥時期の NDVI

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。

肥による増収効果は移植日に関わらず NDVI が低いほど大きく、その中央値は 74～125gm<sup>2</sup> であった(図 4A3)。穂肥によるタンパク質含有率上昇効果は、移植日に関わらず NDVI が高いほど大きかった(図 4C3)。予測区間と x 軸との交点は移植日により異なった(表 5)。白未熟粒数は、NDVI より移植日の影響が大きかった(図 4B1, B2)。穂肥による白未熟粒数の低減効果は、50%予測区間にほとんど x 軸が重なっていた 2021 年 6 月 9 日移植を除いて、NDVI が高いほど大きかった(図 4B3, 表 5)、が最大でも 19～76 とその効果は低水準だった。(図 4B3)。倒伏は全区発生しなかった。

## 考 察

### 1 水稻品種「コシヒカリ」と「彩のかがやき」の穂肥診断

本試験では、埼玉県の主要な水稻品種のリモートセンシングによる穂肥診断方法を検討した。例えば精玄米重であれば、図 3, 4 より、穂肥有と穂肥無の事後分布の差である穂肥効果の予測区間の第一四分位数が 0(x 軸)を上回る場合、75%以上の確率で穂肥の増収効果が予測されることから、その交点の NDVI 値(以下、交点の NDVI 値)は穂肥の要否を決定する基準として利用できると考えられた。

「コシヒカリ」は、NDVI が低いと穂肥の増収効果が得られたが、交点の NDVI 値は移植時期で異なった(図 3A3, 表 5)。移植時期が異なると生育中に経過する気象が異なるため、気象条件に応じた診断が有用と考えられた。出穂前 20 日間は幼穂発育期

にあたり、この時期の追肥は増収に寄与する。一方、出穂後 20 日間の高温により粒重の減少や登熟不良が発生するため、診断時に考慮すべき気象条件は、出穂前後 20 日間の気温と考えられる。しかし、穂肥施用時期に出穂後 20 日間の気温の予測は困難なため、気象庁が毎日発表している 2 週間気温予報値を使用した。最高・最低気温の平均が高いほど交点の NDVI 値が高かった(図 5B)ことから、出穂前 20 日間が高温であるほど、より高い NDVI でも追肥が増収に有効であり、気象に応じた追肥の重要性を示唆する。試験期間中は高温傾向であったため、平年値の利用では外挿範囲が広い(表 4, 図 5B)。移植時期が異なるデータを増やすことで、回帰式の外挿を減らし、診断の精度を上げる必要がある。

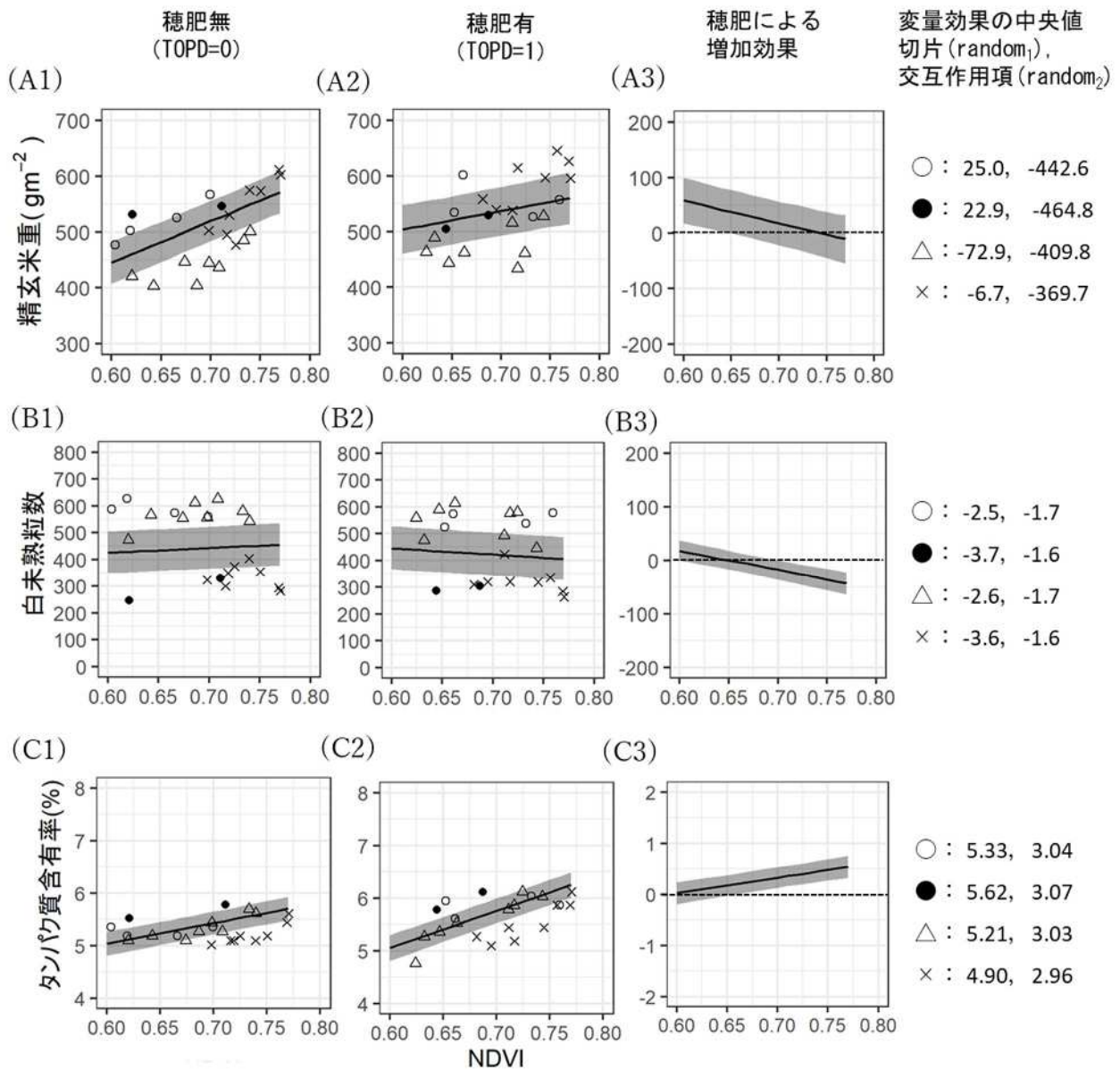
「彩のかがやき」は、NDVI が本試験で得られた 0.67~0.76 の範囲であれば、移植時期に関わらず増収効果が得られた(図 2B, 図 4A3)ため、NDVI がこの範囲のとき、少なくとも穂肥が必要と考えられた。穂肥は籾数を増やすことで収量を増加させるが、過剰だと籾数過多により登熟歩合が低下し、増収効果は得られなくなる(安原ら, 2002)。籾数は幼穂形成期の稲体窒素吸収量に正の相関関係が成立し(小林ら, 1994)、幼穂形成期の稲体窒素吸収量は同時期の NDVI から推定可能(佐々木, 2007)と報告されている。佐々木(2007)の最適稲体窒素吸収量から同時期の目標 NDVI は 0.75~0.79 と算出された。最適な稲体窒素吸収量は品種間差があり(深山, 1986)、NDVI は測定方法により差が生じる(Hiroshi *et al.*, 2023)ことを留意しなければならないが、本試験において、穂肥施用時期の窒素量が不足し、籾数が十分確保できなかった可能性がある。従って、多収を目指す場合、基肥の量や緩効性肥料の窒素溶出パターン、追肥量、追肥時期などを再検討し、穂肥診断時期の稲体窒素量を維持したうえで、穂肥要否診断を検討することが望ましい。

## 2 「コシヒカリ」と「彩のかがやき」の白未熟粒やタンパク質含有率に対する穂肥の影響

本試験では、両品種とも穂肥による白未熟粒数の低減効果は小さく(図 3B3, 4B3)、白未熟粒低減を目的とした NDVI に基づく穂肥診断は困難であった。白未熟粒は、登熟期間の高温だけではなく、幼穂形成期における稲体の窒素含有率や窒素吸収量が低下

すると増加する(田中ら, 2010)。そこで、幼穂形成期以降の窒素追肥による稲体の窒素栄養状態の維持に重点がおかれ(近藤, 2007)、「コシヒカリ」において出穂 3 日前の窒素追肥により基部未熟粒が減少すること(佐藤ら, 2015)、「彩のかがやき」において出穂前 15~10 日前の窒素追肥により白未熟粒が減少すること(岡田ら, 2017)がそれぞれ報告されている。本試験の穂肥時期は出穂前 18~26 日であり、白未熟粒低減を目的とした場合の追肥時期として不適であった可能性がある。そのため、検討する追肥時期の見直しが必要である。また、岡田ら(2017)は、穂肥施用時期(出穂前 23 日頃)の葉色が著しく低下すると、その後追肥を行っても白未熟粒の発生を効果的に減らすことができないことを示しており、生育診断に基づく中間追肥(埼玉県, 2021, 2024b)等の栽培管理により幼穂形成期の葉色を維持することが重要だと考えられる。本試験では、中間追肥を実施しておらず、NDVI も低水準であったため、穂肥施用時期の葉色が低すぎた可能性がある。このため、診断に基づく中間追肥の実施や、葉色を維持できるように溶出パターンを組み合わせた緩効性肥料を施用したうえで、白未熟粒の低減を目的とした穂肥診断技術を検討することが必要と考える。一方、若松ら(2008)は、登熟温度が 28℃を超えると高温登熟性「弱」の品種では、窒素施用量の増加による高温登熟による白未熟粒の低減は困難と指摘している。本試験では、出穂後の平均気温が 28℃を超えたのは 2023 年のみであるが、「彩のかがやき」は高温登熟性が「弱」であり(農林水産省, 2024a)、穂肥の施用による白未熟粒低減効果が得られなかったのは品種による影響も示唆された。

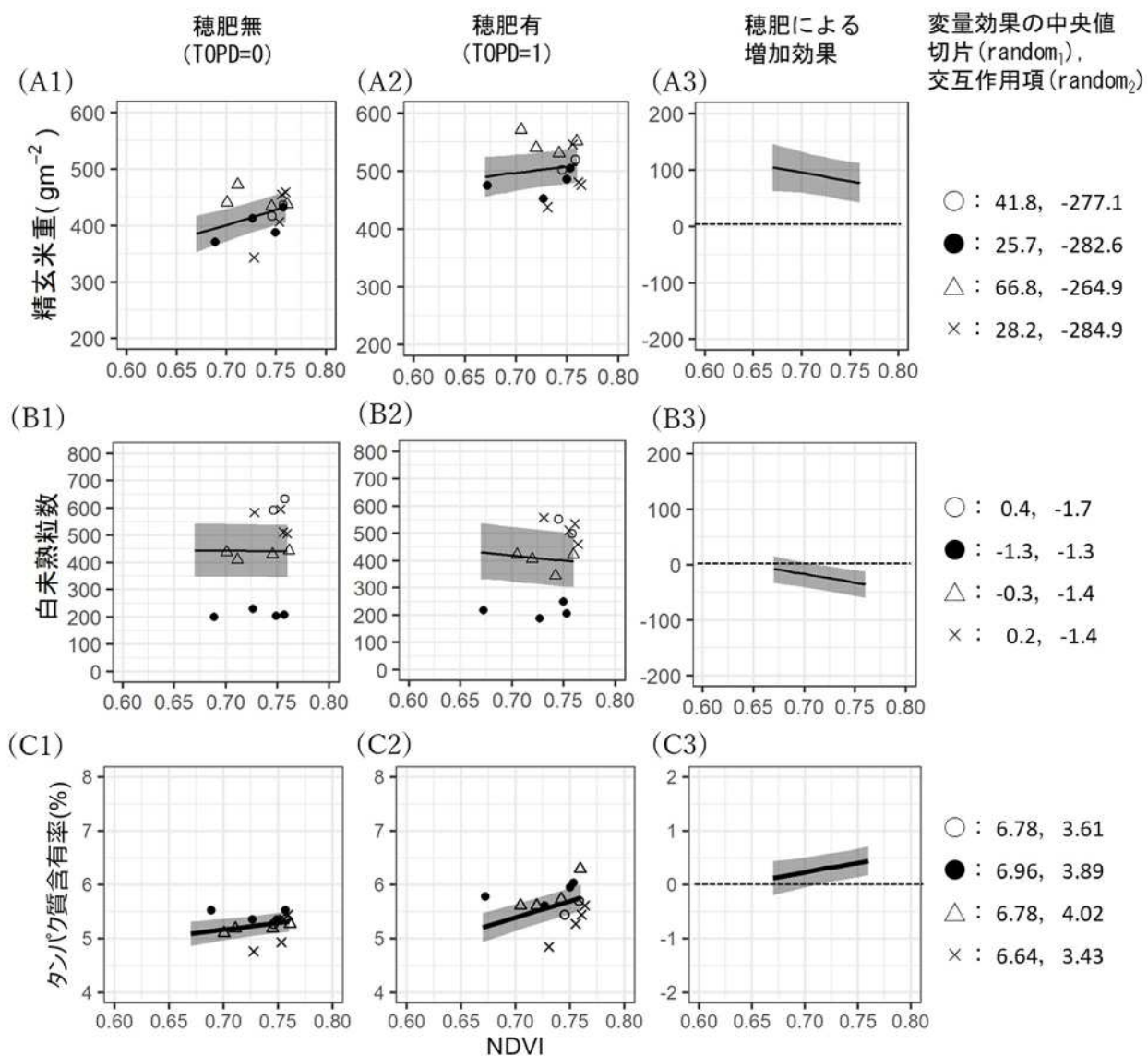
また、玄米タンパク質含有率が 7%を超えると食味が低下するが(若松ら 2004)、本試験では、両品種とも穂肥の有無に関わらずタンパク質含有率は 7%以下であった(図 3C, 4C)ため、食味の低下を考慮していない。遅い追肥や、追肥の増量はタンパク質含有率の上昇につながる(吉野ら, 2007)ため、白未熟粒低減を目的とする生育後半の追肥診断は、タンパク質含有率への影響も勘案する必要があると考えられた。



○ : 2021年4月28日植, ● : 2021年5月12日植, △ : 2022年5月11日植, × : 2023年5月10日植

図3 「コシヒカリ」の収量および子実品質に対するNDVIと穂肥の影響

a) 穂肥無と穂肥有の実線は固定効果のみの事後分布の中央値, 網掛け部は50%ベイズ予測区間, 穂肥効果の実線と網掛け部は穂肥有と穂肥無の差の中央値と50%ベイズ予測区間, 破線は $y=0$ の水平線を示す. 切片とNDVIと穂肥の交互作用項に対する変量効果の事後分布の中央値を右側に示した(図4も同様).



○ : 2021年5月12日植, ● : 2021年6月9日植, △ : 2022年6月8日植, × : 2023年6月9日植

図4 「彩のかがやき」の収量および子実品質に対するNDVIと穂肥の影響

表 5 モデルの 50%予測区間と x 軸との交点

| 品種     | 応答変数                   | 年      | 移植日      | 図 3, 4 の穂肥効果の 50%予測区間と x 軸との交点 |      |        |
|--------|------------------------|--------|----------|--------------------------------|------|--------|
|        |                        |        |          | 第一四分位点                         | 中央値  | 第三四分位点 |
| コシヒカリ  | 精玄米重(gm <sup>2</sup> ) | 固定効果のみ |          | 0.65                           | 0.75 | -      |
|        |                        | 2021   | 4 月 28 日 | 0.63                           | 0.71 | -      |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | -                              | 0.67 | 0.77   |
|        |                        | 2022   | 5 月 11 日 | 0.68                           | 0.76 | -      |
|        |                        | 2023   | 5 月 10 日 | 0.76                           | -    | -      |
|        | 白未熟粒数                  | 固定効果のみ |          | 0.60                           | 0.65 | 0.70   |
|        |                        | 2021   | 4 月 28 日 | -                              | 0.62 | 0.66   |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | 0.62                           | 0.67 | 0.72   |
|        |                        | 2022   | 5 月 11 日 | -                              | 0.64 | 0.67   |
|        |                        | 2023   | 5 月 10 日 | 0.64                           | 0.69 | 0.73   |
|        | タンパク質含有率(%)            | 固定効果のみ |          | 0.66                           | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 4 月 28 日 | 0.65                           | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | 0.65                           | -    | -      |
|        |                        | 2022   | 5 月 11 日 | 0.65                           | -    | -      |
|        |                        | 2023   | 5 月 10 日 | 0.67                           | 0.61 | -      |
| 彩のかがやき | 精玄米重(gm <sup>2</sup> ) | 固定効果のみ |          | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 6 月 9 日  | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2022   | 6 月 8 日  | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2023   | 6 月 9 日  | -                              | -    | -      |
|        | 白未熟粒数                  | 固定効果のみ |          | -                              | -    | 0.72   |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 6 月 9 日  | -                              | 0.74 | -      |
|        |                        | 2022   | 6 月 8 日  | -                              | -    | 0.69   |
|        |                        | 2023   | 6 月 9 日  | -                              | -    | 0.71   |
|        | タンパク質含有率(%)            | 固定効果のみ |          | 0.71                           | -    | -      |
|        |                        | 2021   | 5 月 12 日 | 0.73                           | 0.67 | -      |
|        |                        | 2021   | 6 月 9 日  | 0.68                           | -    | -      |
|        |                        | 2022   | 6 月 8 日  | -                              | -    | -      |
|        |                        | 2023   | 6 月 9 日  | 0.77                           | 0.70 | -      |

a)各品種の本試験で得られた NDVI の範囲外(図 2 参照)の場合, 全て「-」とした.

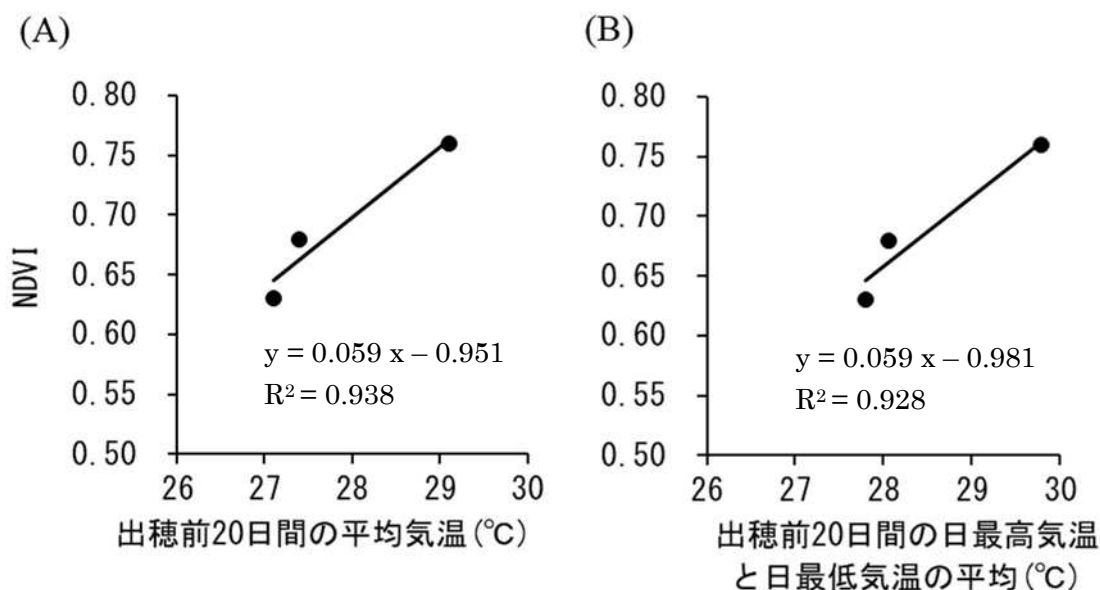


図5 「コシヒカリ」の出穂前20日間の気温と穂肥の増収効果が得られるNDVIとの関係  
a)縦軸は各移植期の増収効果が0である穂肥効果の予測分布の第一四分位数(50%ベイズ予測区間の下限)のNDVI値(表5参照)を示す。

## 引用文献

- 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫(1991)：水稻による施肥窒素の吸収利用率と施肥後の気温及び日照との関係。  
富山県農技セ研報 10：11-17.
- Hiroshi N., Ryo T., Senlin G. and Hideki O. (2023)：Predicting rice grain yield using normalized difference vegetation index from UAV and GreenSeeker. *Crop and Environment* 2(2)：59-65.
- 古川勇一郎・土田徹・中村正明・東聡志・服部誠・今井康貴(2022)：高温登熟条件における「新之助」の品質低下要因と品質低下を抑止するための追加穂肥。新潟農総研報 19：1-8.
- 小林和広・堀江武(1994)：水稻の穎花ならびに枝梗分化に及ぼす生殖生長期の体内窒素の影響。日作紀 63：193-199.
- 近藤始彦(2007)：コメの品質，食味向上のための窒素管理技術(1). 農業および園芸 82(1)：31-34.
- 深山政治・岡部達雄(1984)：水稻の品種特性と最適窒素保有量：作物の最適窒素保有量と窒素の施用法(第1報). 日本土壌肥科学雑誌 55(1)：1-8.

- 森田敏(2005)：水稻の登熟期の高温によって発生する白未熟粒，充実不足および粒重低下. 農業技術 60：6-10.
- 農林水産省(2016)：水稻向け肥効調節型肥料について。  
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/sizai/pdf/matome.pdf>. (2024-9-24 閲覧).
- 農林水産省(2024a)：農林水産植物種類別審査基準・特性表 稲種。  
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/hinshu/info/kijun/1440.pdf>. (2025-3-25 閲覧).
- 農林水産省(2024b)：農産物生産費統計。  
[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/eisanhi\\_nousan/#1](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/eisanhi_nousan/#1). (2024-9-30 閲覧).
- 岡田雄二・石井博和(2017)：水稻「彩のかがやき」の高温障害軽減技術の開発. 埼玉農技研研報 16：15-32.
- 埼玉県(2007)：埼玉県水稻栽培基準.
- 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).
- 埼玉県(2023)：令和5年6月から9月の高温・干

- ばつによる農業災害の特別災害の指定について.  
<https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/245274/news2023112101.pdf>. (2025-3-31 閲覧).
- 埼玉県 (2024a) : 主要農作物奨励品種特性表.
- 埼玉県 (2024b) : 暑さに負けない「彩のかがやき」栽培指針.  
<https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/70308/syuuseikagayakisisin.pdf>. (2024-9-24 閲覧).
- 埼玉県 (2024c) : 令和 6 年 6 月から 9 月の高温による農業災害の特別災害の指定について.  
<https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/261878/news2024121701.pdf>. (2025-3-31 閲覧).
- 佐々木次郎(2007) : 高品質・良食味米の生産に向けた生育情報の予測・診断技術への応用. 農業機械学会誌 69(5) : 12-16.
- 佐藤徹・東聡志・金井政人・白矢武士(2015) : 高温登熟におけるコシヒカリの基部未熟粒を減らす穂肥方法. 北陸作物学会報 50 : 39-41.
- 田中浩平・宮崎真行・内川修・荒木雅登 (2010) : 水稻の外観品質に及ぼす稲体窒素栄養条件や施肥法の影響. 日作紀 79 : 450-459.
- Tanno K. (2021) : Analysis of changes in topdressing application effect on rice by NDVI using hierarchical Bayesian model. *Agronomy Journal* 113, 3434-3443.
- 若松謙一・田之頭拓・重水剛・竹牟禮穰 (2004) : 鹿児島県早期栽培コシヒカリの収量構成要素及び食味に対する栽植密度の影響. 日作九支報 70 : 7-9.
- 若松謙一・佐々木修・上藺一郎・田中明男(2008): 暖地水稻の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響. 日作紀 76, 71-78.
- 安原宏宣・月森弘 (2002) : 窒素施用量が水稻「コシヒカリ」の乳白粒発生に及ぼす影響. 日作中国支報 43, 14-15.
- 吉野裕一・太田和也・在原克之・小山豊(2007) : 穂肥の施用法が水稻の玄米外観品質と食味に及ぼす影響. 千葉農総研研報 6 : 95-102.