

## ビール用二条オオムギの収量阻害要因と改善窒素施用法

仲田聡<sup>1)</sup>・山口昌宏<sup>2)</sup>・新井申<sup>3)</sup>・塚原俊明<sup>4)</sup>・沖山毅・大山亮<sup>5)</sup>・加藤常夫

**摘要:** 栃木県におけるビール用二条オオムギの単収は、収量性の高い新品種に置き替わっているにもかかわらず、1996年産をピークに漸減傾向である。そこで、現場の実態について生産者から聞き取り調査を行い、少収の主要因は湿害と施肥窒素不足であることを明らかにした。次に、「ニューサチホゴールデン」の施肥窒素不足を解消し、効率的な施肥方法を確立するため、農業試験場において施肥量や施肥体系と、収量性および子実粗蛋白質含有率との関係を調査した。その結果、全量基肥の適正な施肥窒素量は現行の指針よりも多い  $10.0 \text{ g m}^{-2}$  を基本とし、収量レベルに応じて圃場毎に施肥量を変えることを提案した。また、全量基肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たり  $26 \text{ g m}^{-2}$  増収するのに対して、茎立期 30 日前および茎立期の追肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たり各々  $45 \sim 46 \text{ g m}^{-2}$  および  $41 \sim 56 \text{ g m}^{-2}$  と高い増収効率を示したことから、分施が望ましい体系であると結論した。ただし、追肥窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たり子実粗蛋白質濃度が  $2.2 \sim 2.5 \text{ g kg}^{-1}$  増加することを考慮する必要がある。追肥前の生育特性 (NDVI/GDD と SPAD 値の積) は、比較的高い精度で収量および子実粗蛋白質含有率を予測できる可能性が示唆された。したがって、茎立期 30 日前および茎立期に生育診断を行い、少収と低蛋白が予測される場合は、追肥を行うことで生育量を確保し、収量および品質の高位安定化が期待できると考えられた。

**キーワード:** 分施肥体系; NDVI/GDD と SPAD 値の積; 二条オオムギ; 収量阻害要因; 収量と子実粗蛋白質含有率の予測

**略語:** NDVI, normalized difference vegetation index (正規化植生指数); GDD, growing degree days (有効積算温度)

## Yield Inhibitors and Improved Nitrogen Management in Two-Row Malting Barley

Satoshi NAKATA, Masahiro YAMAGUCHI, Shin ARAI, Toshiaki TSUKAHARA, Takeshi OKIYAMA, Makoto OYAMA, Tsuneo KATO

**Summary:** The yield of two-row malting barley in Tochigi prefecture has been decreasing from 1996 although the previous cultivars were replaced by the new ones with large production abilities. First, the purpose of the present study was to provide essential information on the inhibitors of the yield. We collected datasets of the chemical properties of soil, farmers' view and barley yields at 39 sampling points from all over the prefecture in 2014-2015 and 2015-2016 seasons. The data sampling was carried out on two fields with different yields levels: high- and low-yield groups, which were managed by the same farmers at each point. The differences in averages between the two groups were analyzed using the paired t-test. The values of drainage and fertility with farmers' view in the high-yield groups were significantly greater than those in the low-yield groups, whereas the other variables such as available nitrogen (N), available phosphate and exchangeable cations were not significant. Second, to establish cultivation method of the cultivar 'New Sachiho Golden', we mainly investigated the fertilization on the grain yield and protein content in andosol upland field for three seasons. Every  $1 \text{ g m}^{-2}$  of N as basal application provided a  $26 \text{ g m}^{-2}$  increase in the yield. In contrast, every  $1 \text{ g m}^{-2}$  of N as topdressing at 30 days before stem elongation beginning (30DBSE) and further additional topdressing at initial stem elongation stage (ISE) provided a  $45\text{-}46 \text{ g m}^{-2}$  and a  $41\text{-}56 \text{ g m}^{-2}$  increase in the yield, respectively. However, it was noteworthy that every  $1 \text{ g m}^{-2}$  of N as topdressing resulted in a  $2.2\text{-}2.5 \text{ g kg}^{-1}$  increase in protein content. The growth diagnosis value (NDVI/GDD multiplies SPAD index) at 30DBSE and ISE potentially predicted the grain yield and protein content. Therefore, the topdressing based on the growth diagnosis value will prevent from low yield even in the case where the crop shows a low growth level.

**Key words:** Malting barley; NDVI/GDD multiplies SPAD index; Nitrogen topdressing; Prediction of grain yield and protein content; Yield Inhibitors

**Abbreviations:** NDVI, normalized difference vegetation index; GDD, growing degree days

1) 現栃木県河内農業振興事務所, 2) 現栃木県安足農業振興事務所, 3) 現栃木県那須農業振興事務所, 4) 現栃木県下都賀農業振興事務所, 5) 現栃木県農政部生産振興課 (2020.12.21 受理)

## I 緒言

栃木県におけるビール用二条オオムギは冬作の基幹作物として位置付けられ、コムギや六条オオムギよりも早く収穫できるメリットがあることから重要品目として生産振興が図られている(栃木県, 2018)。しかしながら、本県における二条オオムギの収量を 1990 年以降で見ると、1996 年産をピークに漸減傾向である(農林水産省, 1990~2019)。

一方で、ビール用二条オオムギの品種については、順次収量性の高いものに切り替わっている(栃木農試, 2016; 栃木県, 2018)。品種構成の変遷を見ると、1996 年産では「ミカモゴールデン」、「あまぎ二条」、「ミサトゴールデン」、「なす二条」が各々 30%、28%、23%、17%と全体の 98%を占めた。2000 年産になると、「タカホゴールデン」(河田ら, 1995)が「ミサトゴールデン」に替わり、「ミカモゴールデン」、「あまぎ二条」、「なす二条」、「タカホゴールデン」が各々 35%、22%、17%、16%となった。その後 2008 年産では「スカイゴールデン」(谷口ら, 2001)が主流となり、「スカイゴールデン」が 71%、「ミカモゴールデン」が 24%となった。2012 年産になると、「サチホゴールデン」(加藤ら, 2006)が普及拡大し、「サチホゴールデン」が 50%、「スカイゴールデン」が 49%となった。2017 年産では「アスカゴールデン」(大関ら, 2013)が生産の一角を占めるようになり、「サチホゴールデン」が 85%、「アスカゴールデン」が 14%となった。そして現在(2020 年産)においては、「ニューサチホゴールデン」(Oozeki *et al.*, 2017)にすべて置き替わっている。このように 1996 年産以降の作付面積 1 位の品種は、「ミカモゴールデン」、「スカイゴールデン」、「サチホゴールデン」、「ニューサチホゴールデン」と推移した。これらの 4 品種の収量を比較すると、「ミカモゴールデン」を 100 とするならば、「スカイゴールデン」が 115、「サチホゴールデン」が 122、「ニューサチホゴールデン」が 123 である(栃木農試, 未発表)。

これらの品種は、オオムギ縞萎縮病抵抗性に関しても改良されている。「ミカモゴールデン」と「ミサトゴールデン」は縞萎縮ウイルス I 型系統 (I 型) に抵抗性だが同 III 型系統 (III 型) に感受性、「なす二条」は III 型に抵抗性だが I 型に感受性、「あまぎ二条」はいずれの型にも感受性である(新井ら, 2018)。I 型抵抗性の「ミカモゴールデン」タイプの品種が III 型に感染すると 30~40%減収し(山口ら, 2002)、いずれの型にも感受性の「あまぎ二条」タイプが感染すると 80%も減収することがある(氏原ら, 1984)。2001 年産までに実施したオオムギ縞萎縮病発生の調査では、本県全域に I 型が、県南地域に III 型が分布し、発生が見られない地点は少なかったことから(五月女ら, 2010a)、1996 年産では県内多くの地域で被害が出ていたことが推察される。「スカイゴールデン」が世界初の I 型および III 型抵抗性の品種として育成され(谷口ら, 2001)、同

品種の普及拡大に伴い、本病の被害は減少していった(栃木県農業環境指導センター, 2016~2019)。「スカイゴールデン」以降に育成された品種はすべて I 型および III 型に抵抗性である(栃木農試, 2016)。

このように収量性や病害抵抗性に関して能力の高い品種に置き替わっているにもかかわらず収量が漸減傾向にあるのは、生産現場に何らかの原因が潜んでいるものと容易に想像できる。病害以外の減収を招く外的要因を挙げると、麦類は生育期間全般にわたって湿害に弱く(吉田, 1977)、麦生育期間の降水量と収量が負の相関関係が強いことはよく知られている(栃木県, 2018)。また、安定生産のためには適期播種、燐酸および pH 改良資材の施用が有効であることが報告されており(五月女ら, 2010b)、県内水田土壌の化学特性が劣化しているとの指摘もある(加藤, 未発表)。しかしながら、本県のオオムギ収量を制限している要因を網羅的に調査・解析した例は無い。そこで、生産現場における生育・収量、営農条件、耕種条件、土壌条件、諸障害発生状況等を統一的に調査し、生産性低下に影響を及ぼしている諸要因を網羅的に解析することにより主要因を明らかにし、同時に対策技術を導入するための簡易的な判断指標を作成し、マニュアル化することを目的として本研究を実施した。ここに一定の成果が得られたので報告する。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「多収阻害要因の診断法および対策技術の開発」により行われた。

## II 材料および試験方法

### 1. 現地試験の概要

2014 年度と 2015 年度の 2 年間、県内各地から多収圃場、少収圃場の 2 つの圃場を同一生産者のペアとして選定し、聞き取り調査、土壌分析、生育調査および収量調査を、各農業振興事務所経営普及部普及指導員の協力を得て実施した。調査圃場数は 2014 年度では 20 ペアの 40 筆、2015 年度では 19 ペアの 38 筆とした。

### 2. 場内試験の概要

#### 1) 試験圃場と供試品種

試験は 2016~2018 年度にわたり、栃木県農業試験場(宇都宮市瓦谷町)内の A-1 圃場(黒ボク土; 以下 A 圃場)と洪積-9 圃場(黒ボク土; 以下 B 圃場)で実施した。

供試品種は 3 か年ともに「ニューサチホゴールデン」とした。

#### 2) 2016 年度の試験区

基肥窒素量の効果を解析するため、硫酸を用いて窒素成分で  $\text{m}^2$  当たり 0, 4, 6, 8, 10, 12, 16 g の 7 水準を設定した(第 1 表)。試験は 2 反復で実施した。各試験区の  $\text{P}_2\text{O}_5$  は過燐酸石灰を用いて  $22.5\text{g m}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  は塩化加里を用いて  $20.0$

g m<sup>-2</sup> に合わせた。その他の耕種方法は以下の通りとした。A 圃場では試験前に堆肥を 2.5 kg m<sup>-2</sup> 散布後、水稻を栽培し、青刈りすき込みした。その後プラソイラーを施工し、BB 土づくり 937 号(OM-37, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:9%, Mg:7%, アルカリ分:37%)を 120 g m<sup>-2</sup> 施用した。B 圃場では試験前に堆肥を 2.5 kg m<sup>-2</sup> 散布後、緑肥作物を栽培し、青刈りすき込み後に湛水した。その後プラソイラーを施工し、BB 土づくり 937 号を 80g m<sup>-2</sup> 施用した。播種は A 圃場、B 圃場ともに、プロットシーダー(HEGE-95B, HEGE 社)を用い、播種量 192 粒 m<sup>-2</sup>, 畦長 5.4m, 条間 20cm の 6 条ドリル播きで行った。播種日は 11 月 7 日とした。

第1表 2016年度の試験区構成

要因	水準
基肥窒素量	0, 4, 6, 8, 10, 12, 16

- 1) 数値はg m<sup>-2</sup>を表示.
- 2) 肥料は硫酸を使用.

### 3) 2017 年度の試験区

追肥時期の効果を解析するため前年度の結果を基に、総窒素施肥量、追肥時期、追肥窒素量を再検討し、A 圃場、B 圃場それぞれで異なる施肥水準を設定した(第2表)。つまり、総窒素施肥量は、2016年度の収量水準が低かったA 圃場ではm<sup>2</sup>当たり0, 12, 16, 20 g, 同年度の収量水準が高かったB 圃場ではm<sup>2</sup>当たり0, 9, 12, 15 gに設定し、茎立期30日前および茎立期の追肥を組合せて分施を行った。窒素肥料の種類は基肥には硫酸、追肥には尿素を使用した。試験は2反復で実施した。各試験区のP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は過燐酸石灰を用いて22.5g m<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>Oは塩化加里を用い20.0g m<sup>-2</sup>に合わせた。茎立期30日前追肥は2月20日、茎立期追肥は3月30日に行った。その他の耕種方法は以下の通りとした。A 圃場では試験前に堆肥を 1.5kg m<sup>-2</sup>散布後、水稻を栽培し、青刈りすき込みした。その後プラソイラーを施工し、BB土づくり937号を120g m<sup>-2</sup>施用した。B 圃場では試験前に湛水し(堆肥無し、前作無し)、その後プラソイラーを施工し、BB土づくり937号を80g m<sup>-2</sup>施用した。播

第2表 2017年度の試験区構成

圃場	試験区名	総窒素	施肥時期		
			基肥	茎立期 30日前	茎立期
A	0 - 0 - 0	-	-	-	-
	12 - 0 - 0	12	12	-	-
	16 - 0 - 0	16	16	-	-
	4 - 12 - 0	4	12	-	-
	4 - 0 - 12	4	-	12	-
	4 - 6 - 6	4	6	6	-
	20 - 0 - 0	20	20	-	-
B	0 - 0 - 0	-	-	-	-
	9 - 0 - 0	9	9	-	-
	12 - 0 - 0	12	12	-	-
	3 - 9 - 0	3	9	-	-
	3 - 0 - 9	3	-	9	-
	3 - 4.5 - 4.5	3	4.5	4.5	-
	15 - 0 - 0	15	15	-	-

- 1) 総窒素および施肥時期の数値は窒素施肥量g m<sup>-2</sup>を表示.
- 2) 基肥は硫酸、追肥は尿素を使用.

種日はA圃場が11月13日、B圃場が11月9日とした。播種方法および試験区面積はすべて2016年度と同一とした。

### 4) 2018 年度の試験区

主に追肥時期別の追肥量効果を解析するため、A圃場、B 圃場に同じ施肥水準を設定した(第3表)。基肥に硫酸およびBBビール麦エース(全窒素の40%を緩効性のLP40が占有)を使用し、それぞれ基肥量として窒素成分でm<sup>2</sup>当たり0, 3, 6, 9, 12, 15 gの6水準を設定した。また、基肥3g区においては茎立期30日前追肥をm<sup>2</sup>当たり0, 3, 6, 9, 12 gの5水準(基肥にBBビール麦エースを用いた試験では0, 3, 6, 9 gの4水準)、基肥3gプラス茎立期30日前3g区においては茎立期追肥をm<sup>2</sup>当たり0, 3, 6, 9 gの4水準(基肥にBBビール麦エースを用いた試験では0, 3, 6 gの3水準)、基肥3gプラス茎立期30日前6g区においては茎立期追肥をm<sup>2</sup>当たり0, 3, 6 gの3水準(基肥にBBビール麦エースを用いた試験では0 gのみ)を設定した。追肥はいずれも尿素を用いた。試験は2反復で実施した。各試験区のP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は過燐酸石灰を用いて22.5g m<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>Oは塩化加里を用いて20.0g m<sup>-2</sup>に合わせた。茎立期30日前追肥は2月15日、茎立期の追肥は3月8日に行った。播種は、A圃場、B圃場ともにプロットシーダー(Monoseed TC, Wintersteiger社)を用い、播種量 226粒 m<sup>-2</sup>, 畦長5.4m, 条間22cmの6条ドリル播きで行った。播種日はA圃場が11月3日、B圃場が11月2日とした。試験前の圃場管理は2017年度と同一とした。

第3表 2018年度の試験区構成

試験区名	施肥時期		
	基肥	茎立期 30日前	茎立期
0 - 0 - 0	-	-	-
3 - 0 - 0	3	-	-
6 - 0 - 0	6	-	-
9 - 0 - 0	9	-	-
12 - 0 - 0	12	-	-
15 - 0 - 0	15	-	-
3 - 3 - 0	3	3	-
3 - 6 - 0	3	6	-
3 - 9 - 0	3	9	-
3 - 12 - 0 *	3	12	-
3 - 3 - 3	3	3	3
3 - 3 - 6	3	3	6
3 - 3 - 9 *	3	3	9
3 - 6 - 3 *	3	6	3
3 - 6 - 6 *	3	6	6
3 - 9 - 3 *	3	9	3

- 1) 施肥時期の数値は窒素施肥量g m<sup>-2</sup>を表示.
- 2) \*は基肥に硫酸を用いた区のみ設定。無印は基肥に硫酸とBBビール麦エースの両方の区を設定.
- 3) 追肥は尿素を使用.

### 3. 調査項目および調査方法

#### 1) 生産者聞き取り調査

調査項目は、圃場条件(排水性、肥沃度)、生育状況(湿害、倒伏、枯れ熟れ、病虫害、雑草害)および栽培管理(排水対策、土作り、施肥量等)とし、生産者から聞き取り調査を行った。

## 2) 土壌分析

現地試験の調査項目は化学性(CEC, pH, EC, 硝酸態窒素, 可給態リン酸, 交換性塩基, 微量元素等), 物理性(土壌水分, 土壌硬度等)とした。化学分析については, 土壌を麦収穫後に採取し, 株式会社JAグリーンとちぎ肥料開発普及部門に委託した。土壌水分は降雨翌日にDM-18(竹村電機製作所社)を用いて土壌表面を測定し, 土壌硬度は乾いているときに山中式硬度計を用いて土壌表面から10cm下と15~20cm下の地中を測定した。

場内試験では, A圃場, B圃場ともに毎年度麦の作付け前に土壌を採取し, 常法(日本土壌協会, 2001)に基づき, 可給態窒素および無機態窒素(硝酸態窒素, アンモニウム態窒素)の含有量を測定した。可給態窒素は, 30°C・4週間保温静置培養による測定値から無機態窒素を差し引いた値とした。

## 3) 茎立期 30 日前および茎立期の生育量

場内試験の2016年度, 2018年度実施の無肥料区および基肥のみの試験区について, 茎立期30日前と茎立期に草丈, 茎数, 正規化植生指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 葉色を測定した。測定日は2016年度が2月20日と3月20日, 2018年度が2月14日と3月5日とした。NDVIはGreenSeeker Handheld Crop Sensor(ニコン・トリンブル社)を用いて地上90~100cmの高さから測定した。NDVIの算出は次式による(Sharma and Bali, 2018)。

$$NDVI = (R_{780nm} - R_{670nm}) / (R_{780nm} + R_{670nm})$$

ここで,  $R_{780nm}$ は780nmの反射率,  $R_{670nm}$ は670nmの反射率を示す。

葉色はSPAD-502Plus(コニカミノルタ社)を用いて最上位の完全展開葉について測定し, SPAD値として表した。算出は次式による(Süß *et al.*, 2015)。

$$SPAD値 = T_{940nm} / T_{650nm}$$

ここで,  $T_{940nm}$ は940nmの透過率,  $T_{650nm}$ は650nmの透過率を示す。

出芽日からNDVIおよびSPAD値測定日までの有効積算温度(growing degree days, GDD)をRaun *et al.*(2001)の方法に従い, 次式により算出した。

$$GDD = \sum (T_{min} + T_{max}) / 2 - T_{base}$$

ここで,  $T_{min}$ は日最低温度,  $T_{max}$ は日最高温度,  $T_{base}$ は基準温度(4.4°C)を示す。なお, 温度はアメダスの栃木県宇都宮市の気温(°C)とした。

## 4) 出穂期以降の生育特性, 収量および子実粗蛋白質

現地試験では成熟期に1圃場につき3か所から合計1坪程度収穫し, 収穫前に稈長, 穂長および穂数を測定した。場内試験では3か年のすべての試験区について, 出穂期, 成熟期, 稈長, 穂長, 穂数, 1穂粒数, 倒伏程度を調査後, プロットコンバイン(2016年, HEGE-125C型, HEGE社; 2017~2018年

度, Classic, Wintersteiger社)にて1区あたり3.6m<sup>2</sup>収穫した。収穫物は平型乾燥機で水分が12%前後になるまで熱風乾燥した後, 唐箕にかけて屑麦等を除いたものを, 収量, 千粒重, 容積重, 整粒歩合, 子実粗蛋白質含有率の調査に供試した。調査は, 「醸造用二条大麦 調査基準 第1版」(農業研究センター, 1986)に準じた。なお, 子実粗蛋白質含有率は近赤外分光計(Inframatic IM7500, Perten Instruments社)により測定し, 燃焼法(SUMIGURAPH® NC-220F, 住化分析センター社)による測定値との関係から導き出された線形回帰式:  $y = 1.0119x + 0.5455$  (ここでxは近赤外分光計の測定値を示す)により補正した。

## III 結果

### 1. 年度別の気象および生育概況

#### 1) 現地の気象と生育(農政部経営技術課発表)

2014年度:気温は12月が低温, 1~2月がやや高温, 3月以降が高温に推移し, 生育は出穂期が平年差-3日, 成熟期が同差-5~-6日となった。収量は平年を上回り, 作柄は「良」であった。

2015年度:気温は生育期間全般を通して高く推移し, 生育は出穂期が平年差-7日, 成熟期が同差-7~-10日となった。子実が細実の傾向で, 作柄は「やや不良」であった。

#### 2) 場内の気象と生育, 圃場別の土壌窒素含有量と収量水準

A圃場に設置した生育診断圃の生育は次の通りであった。なお, 気象はアメダスの宇都宮市データである。

2016年度:冬期はやや高温で推移したが少雨のため生育は緩慢となり, 茎立期が平年差+12日となった。4月以降はやや高温と適度な降雨を伴い, 出穂期が同差+2日, 成熟期が同差0日となった。収量関連形質では, 穂数が同比84%, 1穂粒数が同比109%, 千粒重が同差+2.7g, 整粒重が同比112%であった。

2017年度:冬期は低温と乾燥で推移し, 茎立期が平年差+17日となった。3月以降は高温に転じ, 出穂期が同差+3日, 成熟期が同差+1日となった。収量関連形質では, 穂数が同比81%, 1穂粒数が同比106%, 千粒重が同差+4.7g, 整粒重が同比104%であった。

2018年度:冬期は高温で推移し, 茎立期が平年差-4日となったが, 3月下旬から4月上旬の低温の影響で出穂期が同差0日となった。登熟期間はやや高温で推移し, 成熟期が同差0日, 収量関連形質では, 穂数が同比127%, 1穂粒数が同比96%, 千粒重が同差+0.2g, 整粒重が同比147%であった。

A・B圃場別の可給態窒素と無機態窒素含有量の合計値(mg kg<sup>-1</sup>)と無肥料区の子実重(g m<sup>-2</sup>)を順に示すと, 2016年

度 A 圃場が 71 と 171, 同年度 B 圃場が 124 と 368, 2017 年度 A 圃場が 36 と 102, 同年度 B 圃場が 68 と 272, 2018 年度 A 圃場が 141 と 359, 同年度 B 圃場が 129 と 144 であり, 2018 年度の B 圃場を除いて概ね土壌中の窒素含有量が多い圃場ほど多収量となった. 2018 年度の B 圃場では, 初期生育は旺盛であったが 12 月から 1 月にかけての乾燥の影響を強く受け, 2 月以降の生育が不良となったために土壌中の窒素含有量が比較的多いにもかかわらず少収となった. 以下, 年度毎の収量水準の比較に基づき, 多収圃場, 少収圃場と表記した.

## 2. 現地における低収実態調査結果

土壌の種類別の生育, 収量および子実粗蛋白質含有率は第4表に示した. 灰色低地土では, 少収圃場は多収圃場に比べて, 稈長および穂長が短く, 穂数が少なく, 整粒重が 187g m<sup>-2</sup> 少なかった(多収圃場の 68%). 黒ボク土では, 少収圃場は多収圃場に比べて, 穂長は同程度だが, 稈長が短く, 穂数が少なく, 整粒重が 164g m<sup>-2</sup> 少なかった(多収圃場の 70%). 整粒歩合, 千粒重および子実粗蛋白質含有率は灰色低地土, 黒ボク土ともに少収圃場と多収圃場との間で有意差は見られなかった.

生産者の聞き取り調査では, 灰色低地土, 黒ボク土の双方

において少収圃場は多収圃場に比べて土壌排水性が劣り, 肥沃度が低く, 湿害, 枯れ熟れ, 雑草害が多い傾向が見られた(第5表). 栽培管理方法を見ると, 排水対策については, 額縁明渠は約 5 割, 弾丸暗渠は約 1 割, 心土破砕は約 4 割の生産者が実施していたが, 少収圃場でより多くの排水対策を施している例はほとんど見られなかった. 一方, 土作り資材は約 8 割の生産者が施用していたが, 施用量は多収圃場と少収圃場との間で差が見られなかった. 基肥窒素量は灰色低地土が 6.8~6.9g m<sup>-2</sup>, 黒ボク土が 5.9~6.0g m<sup>-2</sup> であり, 土作り資材と同様に多収圃場と少収圃場との間で差が見られなかった(第5表).

第4表 現地多収圃場と少収圃場の生育, 収量, 子実粗蛋白質

土性	圃場種類	稈長	穂長	穂数	整粒重	整粒歩合	千粒重	子実粗蛋白質
		cm	cm	本m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	%	g	%
灰色低地土 (23ペア)	多収	92	5.8	682	583	93.6	41.7	9.4
	少収	80	5.5	486	396	93.4	41.6	9.4
	t-test	**	*	**	**	n.s.	n.s.	n.s.
黒ボク土 (13ペア)	多収	90	5.5	748	540	89.5	39.4	9.4
	少収	76	5.4	518	376	90.0	39.7	9.8
	t-test	**	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	n.s.
全サンプル (39ペア)	多収	91	5.7	702	564	91.0	40.4	9.5
	少収	79	5.5	494	390	91.8	40.4	9.5
	t-test	**	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	n.s.

- 1) 整粒重, 千粒重は水分12.5%換算. 整粒は2.5mm縦目篩上.
- 2) 子実粗蛋白質は無水換算.
- 3) \*\*, \*: 1%, 5%水準で有意. n.s.: 有意差無し.

第5表 生産者聞き取りによる現地多収圃場と少収圃場の土壌条件, 生育状況および栽培管理方法

土性	圃場種類	土壌		麦生育状況					排水対策			施肥				
		排水性	肥沃度	湿害	倒伏	枯れ熟れ	病虫害	雑草害	額縁明渠	弾丸暗渠	心土破砕	土作り資材	同左施用量	堆肥	基肥窒素量	
		0-2	0-2	0-1	0-1	0-2	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	g m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>
灰色低地土 (23ペア)	多収	1.62	1.33	0.87	0.70	1.78	1.00	0.94	0.65	0.09	0.48	0.87	69.7	0.09	6.80	
	少収	1.05	0.71	0.61	0.87	1.39	1.00	0.82	0.61	0.13	0.48	0.87	69.7	0.09	6.86	
	t-test	*	**	*	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
黒ボク土 (13ペア)	多収	1.57	1.38	0.85	0.69	1.92	1.00	1.00	0.31	0.08	0.31	0.69	96.7	0.15	5.92	
	少収	0.86	0.69	0.46	0.85	1.54	1.00	0.67	0.31	0.08	0.23	0.77	90.0	0.23	5.98	
	t-test	n.s.	*	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
全サンプル (39ペア)	多収	1.62	1.41	0.87	0.66	1.84	1.00	0.96	0.51	0.10	0.38	0.79	74.8	0.10	6.53	
	少収	1.00	0.70	0.58	0.84	1.42	1.00	0.78	0.49	0.13	0.36	0.82	72.8	0.13	6.59	
	t-test	**	**	**	n.s.	**	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

- 1) 土壌排水性は, 良い: 2, 普通: 1, 悪い: 0で評価. 土壌肥沃度は, 高い: 2, 普通: 1, 低い: 0で評価.
- 2) 湿害, 倒伏, 病虫害, 雑草害は, 無し: 1, 有り: 0で評価. 枯れ熟れは, 無し: 2, 少: 1, 中: 0で評価.
- 3) 額縁明渠, 弾丸暗渠, 心土破砕は, 実施: 1, 未実施: 0で評価.
- 4) 土作り資材, 堆肥は, 施用: 1, 未施用: 0で評価.
- 5) \*\*, \*: 1%, 5%水準で有意. n.s.: 有意差無し.

第6表 現地の多収圃場と少収圃場における土壌化学特性

土性	圃場種類	CEC	pH	EC	硝酸態窒素	可給態燐酸	交換性石灰	交換性苦土	交換性加里	塩基飽和度	石灰/苦土	苦土/加里	マンガン	ほう素	亜鉛	銅
		me		ms cm <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	%			ppm	ppm	ppm	ppm				
灰色低地土 (23ペア)	多収	15.8	5.87	0.12	44.2	390	2221	363	340	64.4	6.54	1.10	3.42	0.46	10.0	16.8
	少収	15.5	5.96	0.12	42.7	330	2213	377	346	66.5	6.11	1.12	3.45	0.47	8.4	19.4
	t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
黒ボク土 (13ペア)	多収	26.1	6.16	0.12	39.9	334	3999	756	615	72.5	6.09	1.35	1.83	0.51	12.7	5.9
	少収	25.2	6.01	0.12	38.2	302	3597	746	521	66.4	5.84	1.47	2.36	0.53	11.0	6.2
	t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	†	n.s.
全サンプル (39ペア)	多収	19.5	5.96	0.12	41.6	371	2830	498	441	66.7	6.33	1.17	2.93	0.47	11.3	13.4
	少収	18.9	5.95	0.12	39.9	317	2660	498	399	65.2	5.95	1.25	3.03	0.48	9.5	15.9
	t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	†	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.

\*, †: 5%, 10%水準で有意. n.s.: 有意差無し.

土壌化学性については、少収圃場は多収圃場に比べ、可溶性態リン酸、石灰/苦土比、亜鉛が少ない傾向が見られたが、pH、硝酸態窒素等の他の特性には有意差は認められなかった(第6表)。土壌水分および土壌硬度については、少収圃場と多収圃場との間で明確な差は見られなかった(データ省略)。

### 3. 場内における基肥窒素に対する反応

基肥窒素量が生育、収量および子実粗蛋白質含有率に及ぼす影響を第7表に示した。基肥窒素量(速効性の硫酸を使用)を増肥すると、3 か年ともに多収圃場、少収圃場のいずれにおいても稈長が高くなり、穂数が増加し、子実重および整粒重が増加した。1穂粒数、容積重も基肥窒素量の増肥に伴い増加する傾向が見られた。一方、整粒歩合および千粒重

への影響は小さかった。成熟期は2016年度の多収圃場では基肥窒素量の増肥に伴い遅くなる傾向が見られたが、2018年度の少収圃場では逆に早くなるなど、一定の傾向が見られなかった。倒伏は2018年度多収圃場の12および15g<sup>m</sup>-2区でわずかに認められる程度であった。ただし、2016年度多収圃場の16g<sup>m</sup>-2区では倒伏は無かったが、稈長が95cm超、穂数が1000本<sup>m</sup>-2超となった。子実粗蛋白質含有率は、高含有率の2017年度少収圃場以外では9~12%の範囲に収まった。基肥窒素量との関係を見ると、多収圃場では窒素量の増肥に伴い高含有率になったが、少収圃場ではほとんど影響しなかった。

2018年度の単年度結果ではあるが、基肥に肥効調節型肥料のBBビール麦エースを用いた試験区でも、速効性の硫酸を用いた試験区とほぼ同じ結果となった(データ省略)。

第7表 基肥窒素量が生育、収量、子実粗蛋白質含有率に及ぼす影響

年度	圃場	基肥窒素 g m <sup>-2</sup>	成熟期 月/日	稈長 cm	穂長 cm	1穂粒数	穂数 本 m <sup>-2</sup>	倒伏 0-5	子実重 g m <sup>-2</sup>	整粒重 g m <sup>-2</sup>	整粒歩合 %	千粒重 g	容積重 g L <sup>-1</sup>	子実粗蛋白質 %
2016	A 少収	0	5/31	57 d	5.5	23.1 b	294 c	0.0	171 d	164 d	96.0	45.4	702 b	10.2
		4	5/30	67 cd	6.2	25.8 ab	368 bc	0.0	312 cd	296 cd	94.8	45.3	718 ab	10.9
		6	5/30	72 bcd	6.0	26.6 a	406 bc	0.0	351 c	336 c	96.0	45.6	708 b	9.8
		8	5/30	80 abc	6.6	26.4 ab	434 bc	0.0	428 bc	410 bc	95.9	45.8	708 b	9.9
		10	5/31	88 ab	6.6	27.5 a	596 ab	0.0	567 ab	546 ab	96.4	46.5	714 ab	9.8
		12	5/30	88 ab	6.1	26.8 a	587 ab	0.0	574 ab	552 ab	96.1	45.3	718 ab	9.8
		16	5/31	95 a	6.5	27.6 a	744 a	0.0	707 a	677 a	95.7	46.6	727 a	10.4
		ANOVA	n.s.	**	n.s.	*	**	**	**	**	n.s.	n.s.	*	n.s.
	B 多収	0	5/28 c	70 c	6.0	23.4	485 d	0.0	368 e	342 d	92.8	43.2	699 d	9.3 c
		4	5/28 c	85 b	6.1	26.1	718 cd	0.0	617 d	585 c	94.8	45.1	714 cd	9.8 bc
		6	5/29 bc	85 b	6.3	24.7	743 c	0.0	691 cd	647 bc	93.7	45.5	715 cd	9.9 abc
		8	5/30 abc	88 ab	6.4	26.1	775 bc	0.0	758 bcd	720 abc	95.0	44.5	725 bc	10.4 abc
		10	5/30 abc	95 a	6.3	26.4	906 abc	0.0	821 abc	781 ab	95.2	45.0	733 ab	10.7 abc
		12	5/31 ab	94 a	6.4	25.8	1019 ab	0.0	879 ab	842 a	95.8	45.1	736 ab	11.1 ab
		16	6/02 a	97 a	6.6	25.8	1065 a	0.0	948 a	902 a	95.2	45.2	744 a	11.7 a
		ANOVA	**	**	n.s.	n.s.	**	**	**	**	n.s.	n.s.	**	*
2017	A 少収	0	5/30	43 b	5.4 b	20.4 b	177 b	0.0	102 b	99 b	96.4 a	48.4	733	12.0
		12	5/31	72 a	6.8 a	25.8 a	478 a	0.0	480 ab	457 ab	95.2 a	49.9	730	11.4
		16	6/01	81 a	7.4 a	26.0 a	648 a	0.0	656 a	618 a	94.2 ab	49.7	741	12.0
		20	6/02	80 a	7.2 a	25.8 a	682 a	0.0	648 a	592 a	91.2 b	50.2	740	12.7
		ANOVA	n.s.	**	**	**	**	*	*	*	n.s.	n.s.	**	n.s.
	B 多収	0	5/26	60 b	5.9 b	21.4 b	329 b	0.0	272 b	258 b	94.7	46.7 b	741 b	9.5 b
		9	5/27	89 a	7.0 ab	25.0 ab	695 a	0.0	777 a	739 a	95.1	48.3 ab	756 ab	9.7 b
		12	5/28	93 a	7.0 ab	27.1 a	836 a	0.0	806 a	762 a	94.6	48.2 ab	762 a	10.4 ab
		15	5/28	96 a	7.5 a	26.5 a	891 a	0.0	842 a	792 a	94.1	48.4 a	758 a	11.2 a
			ANOVA	n.s.	**	*	*	**	**	**	**	n.s.	*	*
2018		B 少収	0	6/01 a	43 c	5.1	15.5	407 b	0.0	144	127	88.4	41.1	713
	3		6/01 a	42 c	4.4	15.2	515 ab	0.0	190	165	86.9	40.3	712	9.9
	6		5/30 ab	53 bc	5.2	19.6	597 ab	0.0	288	249	86.6	40.6	716	10.2
	9		5/27 ab	62 ab	4.8	20.0	677 ab	0.0	400	348	86.9	40.7	720	9.6
	12		5/25 ab	70 a	5.3	20.4	787 a	0.0	535	459	85.8	40.4	727	9.3
		15	5/24 b	70 a	5.1	21.1	761 a	0.0	545	479	87.9	40.9	733	8.8
		ANOVA	*	**	n.s.	n.s.	*	*	※	※	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	A 多収	0	5/30	57 c	5.4	20.5	550	0.0	359 b	310 b	86.4	42.7	714	9.8
		3	5/29	64 bc	5.6	21.2	601	0.0	411 b	360 b	87.5	41.6	717	9.6
		6	5/27	70 bc	5.5	21.4	674	0.0	488 ab	436 ab	89.4	43.0	726	9.2
9		5/27	77 ab	5.5	21.5	911	0.0	682 ab	579 ab	85.1	42.1	723	9.4	
12		5/26	80 ab	5.6	22.3	809	1.1	696 ab	597 ab	85.9	42.4	722	9.6	
		15	5/27	86 a	6.0	23.0	1000	0.9	809 a	692 a	85.6	42.7	722	10.2
	ANOVA	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

1) 硫酸を用いた基肥窒素のみの試験区について解析。場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。  
 2) 子実重、整粒重、千粒重は水分12.5%換算。子実粗蛋白質は無水換算。整粒は2.5mm縦目篩上。倒伏は0(無)~3(中)~5(基)の6段階評価。  
 3) ANOVA(分散分析)は年度・圃場毎に実施。\*\*, \*, 1%, 5%水準で有意。n.s.:有意差無し。  
 4) 同一の英文字は、Tukeyの多重比較(5%水準)で有意差無し。  
 5) ※は分散分析の結果が5%水準で有意であったが、Tukeyの多重比較検定では、いずれの水準間でも有意差無し。

4. 場内における追肥時期(莖立期 30 日前および莖立期)の影響

追肥重視の施肥体系において、追肥時期が生育、収量および子実粗蛋白質含有率に及ぼす影響(2017年度)を第8表に示した。

少収圃場では、基肥窒素を 4g m<sup>-2</sup>と少なくとも莖立期 30 日前に 12g m<sup>-2</sup>の追肥(4-12-0)を行うと、総窒素施肥量が等しい全量基肥の 16-0-0 よりも穂数がやや多くなり、収量がや

や多くなる傾向が見られた。子実粗蛋白質含有率は全般的に高含有率となり、4-12-0、16-0-0 とともに 12.0%を超過した。一方、莖立期のみ追肥(4-0-12)を行うと、16-0-0 や 4-12-0 に比べて収量が低くなる傾向があった。これは穂数が増加傾向にあったが、1穂粒数が有意に減少したことが原因であった。また、4-0-12 は成熟期が有意に遅くなり、稈長が有意に短く、整粒歩合が有意に低くなった。莖立期 30 日前と莖立期の両方への各々 6g m<sup>-2</sup>の追肥(4-6-6)は、4-12-0 と比べ収量

第8表 窒素追肥の時期(莖立期30日前と莖立期)が生育、収量、子実粗蛋白質含有率に及ぼす影響(2017年度)

圃場	試験区名 (施肥体系)	成熟期 月/日	稈長 cm	穂長 cm	1穂粒数	穂数 本 m <sup>-2</sup>	子実重 g m <sup>-2</sup>	整粒重 g m <sup>-2</sup>	整粒歩合 %	千粒重 g	容積重 g L <sup>-1</sup>	子実粗蛋白質 %
A 少収	0 - 0 - 0 (参考)	5/30	43	5.4	20.4	177	102	99	96.4	48.4	733	12.0
	12 - 0 - 0 (参考)	5/31	72	6.8	25.8	478	480	457	95.2	49.9	730	11.4
	16 - 0 - 0	6/01 b	81 a	7.4 a	26.0 a	648	656	618	94.2 a	49.7	741	12.0
	4 - 12 - 0	6/01 ab	85 a	7.3 a	26.1 a	720	755	701	93.0 ab	49.7	736	13.0
	4 - 0 - 12	6/04 a	58 b	6.1 b	24.1 b	846	648	567	87.5 b	47.6	712	12.3
	4 - 6 - 6	6/01 b	77 a	7.0 a	25.8 a	741	763	707	92.6 ab	49.1	734	12.2
ANOVA		*	**	**	*	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
B 多収	0 - 0 - 0 (参考)	5/26	60	5.9	21.4	329	272	258	94.7	46.7	741	9.5
	9 - 0 - 0 (参考)	5/27	89	7.0	25.0	695	777	739	95.1	48.3	756	9.7
	12 - 0 - 0	5/28 b	93 a	7.0	27.1	836 b	806	762	94.6 a	48.2 a	762 a	10.4
	3 - 9 - 0	5/29 ab	91 a	7.0	26.6	809 b	772	729	94.5 a	49.0 a	763 a	10.6
	3 - 0 - 9	6/01 a	77 b	6.9	25.2	1390 a	1072	875	81.7 c	44.0 b	726 b	10.7
	3 - 4.5 - 4.5	5/28 b	92 a	7.2	26.0	911 b	857	790	92.2 b	48.7 a	761 a	10.9
ANOVA		*	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	**	**	n.s.

- 1) 試験区名(施肥体系)は、「基肥(硫安)」-「莖立期30日前追肥」-「莖立期追肥」の順に窒素成分量g m<sup>-2</sup>を表示。
- 2) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 3) 倒伏はすべての試験区で無かった。
- 4) 子実重、整粒重、千粒重は水分12.5%換算。子実粗蛋白質は無水換算。整粒は2.5mm縦目篩上。
- 5) 分散分析(ANOVA)は圃場毎に実施。\*\*, \*, 1%, 5%水準で有意。n.s.:有意差無し。
- 6) 同一の英文字は、Tukeyの多重比較(5%水準)で有意差無し。

第9表 同一総窒素量内の莖立期30日前と莖立期の追肥量の変動が生育、収量、子実粗蛋白質含有率に及ぼす影響(2018年度)

圃場	試験区名 (施肥体系)	成熟期 月/日	稈長 cm	穂長 cm	1穂粒数	穂数 本 m <sup>-2</sup>	倒伏程度 0-5	子実重 g m <sup>-2</sup>	整粒重 g m <sup>-2</sup>	整粒歩合 %	千粒重 g	容積重 g L <sup>-1</sup>	子実粗蛋白質 %	
B 少収	12 - 0 - 0	5/25	70	5.3	20.4	787 c	0.0 b	535	459	85.8 ab	40.4 c	727	9.3	
	3 - 9 - 0	5/28	75	5.6	20.1	1042 b	0.6 a	699	630	90.2 a	44.4 a	731	10.2	
	3 - 6 - 3	5/27	70	5.0	20.2	1061 b	0.0 b	663	590	89.0 ab	43.5 ab	732	9.8	
	3 - 3 - 6	5/29	71	5.6	21.0	1125 a	0.5 a	667	567	85.0 b	41.5 bc	722	9.7	
	ANOVA		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	**	n.s.	n.s.	*	**	n.s.	n.s.
	15 - 0 - 0	5/24 b	70 b	5.1 b	21.1	761 b	0.0	545 b	479 b	87.9	40.9	733	8.8 b	
3 - 12 - 0	5/27 a	74 ab	5.8 a	20.5	1004 ab	0.7	780 a	693 a	89.0	44.6	734	10.2 a		
3 - 9 - 3	5/28 a	75 ab	5.7 a	20.5	1141 a	0.8	818 a	727 a	88.9	43.7	739	10.6 a		
3 - 6 - 6	5/29 a	75 ab	5.5 a	20.3	1195 a	0.7	775 a	658 a	85.1	42.8	727	10.4 a		
3 - 3 - 9	5/30 a	76 a	5.6 a	20.4	1236 a	2.1	813 a	661 a	81.2	41.5	717	10.4 a		
ANOVA		**	*	**	n.s.	*	n.s.	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	**	
A 多収	12 - 0 - 0	5/26	80	5.6	22.3	809	1.1	696	597	85.9 ab	42.4	722	9.6 c	
	3 - 9 - 0	5/28	84	6.2	23.4	1046	0.0	860	750	87.3 a	42.9	731	10.5 ab	
	3 - 6 - 3	5/27	77	5.9	21.9	960	0.4	751	661	88.0 a	43.6	722	10.1 bc	
	3 - 3 - 6	5/30	80	6.0	22.3	1119	1.8	919	773	84.2 b	42.3	723	10.8 a	
	ANOVA		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	**
	15 - 0 - 0	5/27	86 a	6.0 ab	23.0	1000 b	0.9	809	692	85.6	42.7 bc	722	10.2	
3 - 12 - 0	5/30	84 a	6.3 a	21.6	1152 ab	2.3	893	768	85.9	43.7 ab	723	11.2		
3 - 9 - 3	5/31	84 a	6.1 ab	22.2	1111 ab	1.6	930	787	84.7	44.3 a	728	11.4		
3 - 6 - 6	5/31	82 ab	5.7 ab	21.8	1229 ab	2.4	808	668	82.6	42.0 c	717	10.7		
3 - 3 - 9	5/31	78 b	5.7 b	21.9	1339 a	2.8	892	726	81.3	41.5 c	712	10.9		
ANOVA		n.s.	*	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	

- 1) 試験区名(施肥体系)は、「基肥(硫安)」-「莖立期30日前追肥」-「莖立期追肥」の順に窒素成分量g m<sup>-2</sup>を表示。
- 2) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 3) 子実重、整粒重、千粒重は水分12.5%換算。子実粗蛋白質は無水換算。整粒は2.5mm縦目篩上。倒伏は0(無)~3(中)~5(甚)の6段階評価。
- 4) 分散分析(ANOVA)は圃場毎に実施。\*\*, \*, 1%, 5%水準で有意。n.s.:有意差無し。
- 5) 同一の英文字は、Tukeyの多重比較(5%水準)で有意差無し。

が同程度、子実粗蛋白質含有率はともに12.0%超過でほぼ同程度であった。倒伏は少収圃場のいずれの試験区においても認められなかった。

多収圃場で基肥窒素を3g m<sup>-2</sup>と少なくした場合、莖立期30日前に9g m<sup>-2</sup>の追肥(3-9-0)を行うと、総窒素施肥量が等しい全量基肥の12-0-0とほぼ同水準の収量が得られた。子実粗蛋白質含有率については10.0~11.0%の適正範囲内に収まり、差が無かった。一方、莖立期のみ追肥(3-0-9)する場合は、少収圃場の結果とは異なり、12-0-0や3-9-0に比べて穂数が顕著に増加して多収量となったが、遅れ穂の発生が著しく多く、成熟期が有意に遅くなり、稈長も有意に短くなった。また、千粒重や容積重が有意に軽くなり、整粒歩合が有意に低下した。莖立期30日前と莖立期の両方への各々4.5g m<sup>-2</sup>の追肥(3-4.5-4.5)は、収量、子実粗蛋白質含有率ともに3-9-0や12-0-0とほぼ同程度であった。倒伏は多収圃場のいずれの試験区でも認められなかった。

第9表には莖立期30日前および莖立期の追肥窒素量を同一総窒素量内で変動させたときの収量および子実粗蛋白

質含有率に及ぼす影響(2018年度)を示した。

少収圃場の総窒素量12g m<sup>-2</sup>の比較では、全量基肥(12-0-0)よりも分施(3-9-0, 3-6-3および3-3-6)の方が穂数は有意に多く、千粒重は有意に重く、多収になる傾向が見られた。ただし、莖立期への追肥に重点を置くほど小粒になる傾向が見られ、3-3-6は3-9-0よりも千粒重および整粒歩合が低下した。子実粗蛋白質含有率は全般的に低含有率であったが、12-0-0よりも分施の方がやや高まる傾向が見られた。総窒素量15g m<sup>-2</sup>の比較でも全量基肥(15-0-0)よりも分施(3-12-0, 3-9-3, 3-6-6および3-3-9)の方が穂数増で多収となった。やはり莖立期への追肥に重点を置くほど小粒になる傾向が見られ、3-3-9では他の分施区よりも千粒重および整粒歩合が小さい傾向にあった。また、3-3-9では“少”程度の倒伏が発生した。子実粗蛋白質含有率は15-0-0では8.8%と低含有率であったが、分施ではいずれの区でも10%台の適正值であった。

多収圃場の総窒素量12g m<sup>-2</sup>の比較では、全量基肥(12-0-0)よりも分施(3-9-0, 3-6-3および3-3-6)の方が多穂数、多収になる傾向が見られたが、莖立期追肥に重点を置いた3-3-6

第10表 生育、収量、子実粗蛋白質含有率に及ぼす莖立期30日前と莖立期における追肥窒素の量効果(2018年度)

圃場	試験区名 (施肥体系)	成熟期	稈長	穂長	1穂粒数	穂数	倒伏程度	子実重	整粒重	整粒歩合	千粒重	容積重	子実粗蛋白	
		月/日	cm	cm	本 m <sup>-2</sup>	0-5	g m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>	%	g	g L <sup>-1</sup>	%		
B 少収	3-0-0	6/01 a	42 d	4.4 b	15.2	515 c	0.0	190 d	165 c	86.9	40.3 b	712	9.9	
	3-3-0	5/27 ab	59 c	5.0 ab	18.4	682 bc	0.0	337 cd	297 bc	88.0	42.2 ab	720	9.7	
	3-6-0	5/26 b	67 b	5.1 ab	19.3	782 ab	0.0	515 bc	460 b	89.2	42.9 a	729	9.9	
	3-9-0	5/28 ab	75 a	5.6 a	20.1	1042 a	0.6	699 ab	630 a	90.2	44.4 a	731	10.2	
	3-12-0	5/27 ab	74 ab	5.8 a	20.5	1004 a	0.7	780 a	693 a	89.0	44.6 a	734	10.2	
	ANOVA	*	**	*	n.s.	**	n.s.	**	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	*
	A 多収	3-0-0	5/29	64 c	5.6	21.2	601 c	0.0 b	411 b	360 b	87.5	41.6	717	9.6 b
		3-3-0	5/26	70 bc	5.8	21.4	668 c	0.0 b	490 b	434 b	88.6	42.7	720	9.3 b
		3-6-0	5/26	75 ab	5.4	21.6	899 b	0.0 b	693 ab	613 ab	88.5	43.5	722	9.8 b
		3-9-0	5/28	84 a	6.2	23.4	1046 ab	0.0 b	860 a	750 a	87.3	42.9	731	10.5 ab
3-12-0		5/30	84 a	6.3	21.6	1152 a	2.3 a	893 a	768 a	85.9	43.7	723	11.2 a	
ANOVA	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	**	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	
B 少収	3-3-0	5/27 bc	59 c	5.0 b	18.4	682 b	0.0 b	337 b	297 c	88.0	42.2	720	9.7	
	3-3-3	5/26 c	61 bc	5.0 b	19.7	821 b	0.0 b	496 b	425 bc	85.7	41.2	722	9.6	
	3-3-6	5/29 ab	71 ab	5.6 a	21.0	1125 a	0.5 ab	667 a	567 ab	85.0	41.5	722	9.7	
	3-3-9	5/30 a	76 a	5.6 a	20.4	1236 a	2.1 a	813 a	661 a	81.2	41.5	717	10.4	
	ANOVA	*	**	*	n.s.	**	**	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
	A 多収	3-3-0	5/26	70 b	5.8	21.4	668	0.0	490 b	434 b	88.6 a	42.7 a	720	9.3 b
		3-3-3	5/28	74 ab	5.7	21.5	923	0.0	743 a	634 ab	85.4 ab	42.9 a	718	10.2 ab
		3-3-6	5/30	80 a	6.0	22.3	1119	1.8	919 a	773 a	84.2 ab	42.3 ab	723	10.8 a
		3-3-9	5/31	78 a	5.7	21.9	1339	2.8	892 a	726 a	81.3 b	41.5 b	712	10.9 a
		ANOVA	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	**	*	*	n.s.	*
B 少収	3-6-0	5/26 b	67 b	5.1 ab	19.3	782 b	0.0	515 b	460 b	89.2	42.9	729	9.9	
	3-6-3	5/27 ab	70 ab	5.0 b	20.2	1061 ab	0.0	663 a	590 a	89.0	43.5	732	9.8	
	3-6-6	5/29 a	75 a	5.5 a	20.3	1195 a	0.7	775 a	658 a	85.1	42.8	727	10.4	
	ANOVA	*	*	*	n.s.	**	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
	A 多収	3-6-0	5/26	75	5.4	21.6	899 b	0.0	693	613	88.5 a	43.5	722	9.8
		3-6-3	5/27	77	5.9	21.9	960 b	0.4	751	661	88.0 a	43.6	722	10.1
		3-6-6	5/31	82	5.7	21.8	1229 a	2.4	808	668	82.6 b	42.0	717	10.7
		ANOVA	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.

1) 試験区名(施肥体系)は、「基肥(硫安)」-「莖立期30日前追肥」-「莖立期追肥」の順に窒素成分量g m<sup>-2</sup>を表示。  
 2) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。  
 3) 子実重、整粒重、千粒重は水分12.5%換算。子実粗蛋白は無水換算。整粒は2.5mm縦目篩上。倒伏は0(無)~3(中)~5(甚)の6段階評価。  
 4) 分散分析(ANOVA)は圃場毎に実施。\*\*, \*: 1%, 5%水準で有意。n.s.: 有意差無し。  
 5) 同一の英文字は、Tukeyの多重比較(5%水準)で有意差無し。

では 3-9-0 や 3-6-3 に比べて整粒歩合が低下するとともに、“少”程度の倒伏が発生した。子実粗蛋白質含有率は 12-0-0 では9%台であったが、分施ではいずれの区でも10%台であった。総窒素量 15g m<sup>2</sup> の比較では、全量基肥(15-0-0)では倒伏が“微”程度であったが、分施(3-12-0, 3-9-3, 3-6-6 および 3-3-9)では倒伏が“少”～“中”程度に発生した。

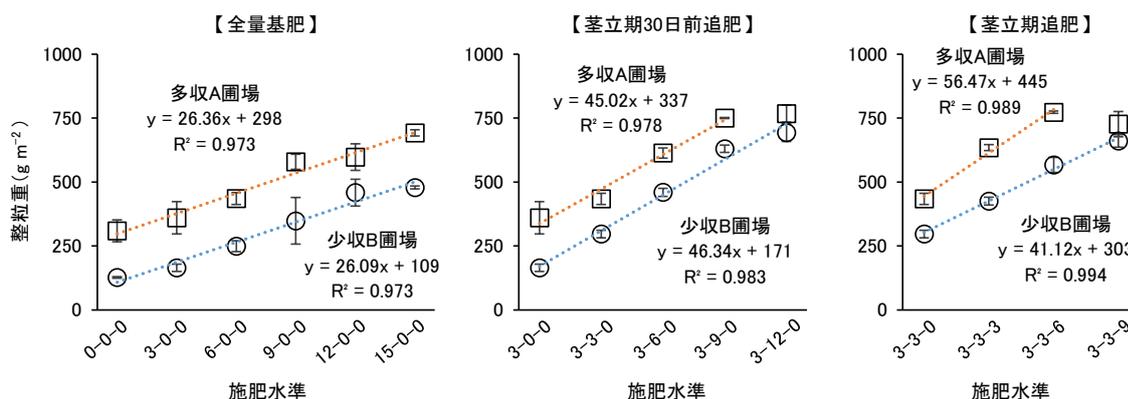
### 5. 場内における茎立期 30 日前および茎立期の追肥量効果

生育、収量および子実粗蛋白質含有率に及ぼす追肥時期別の窒素量効果を第 10 表に示した。茎立期 30 日前の追肥では、少収圃場、多収圃場のいずれにおいても窒素量増加に伴い、稈長および穂数が有意に増加し、整粒重が有意に増加した。穂長および千粒重も窒素量増加に伴い増加し、少収圃場でその傾向が強かった。しかし、整粒歩合および容積重には少収圃場、多収圃場ともにほとんど影響を及ぼさなかった。子実粗蛋白質含有率は追肥窒素量増加に伴い高まり、多収圃場でその傾向がより明確であったが、最も高含有率になった試験区(3-12-0)でも 11.2%であった。

茎立期 30 日前に 3g m<sup>2</sup> 追肥した後の茎立期追肥でも、窒素量増加に伴い稈長および穂数が増加し、整粒重が有意に増加した。ただし、整粒歩合や千粒重が減少する傾向が見られ、多収圃場でその傾向が強かった。子実粗蛋白質含有率は、追肥窒素量増加に伴い高まり、多収圃場でその傾向がより明確であったが、11%未満に収まった。

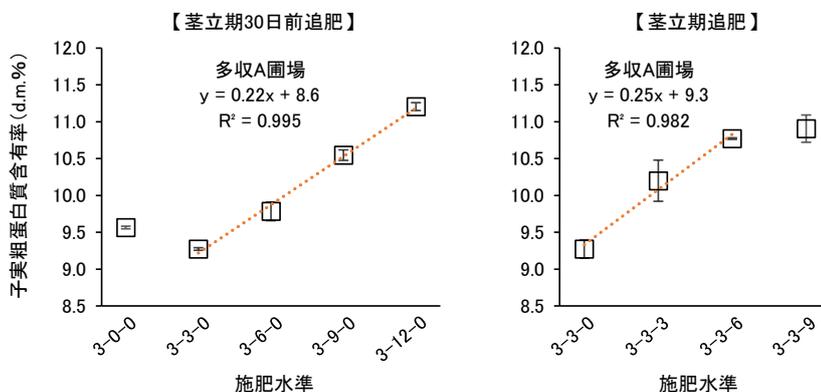
2018 年度試験において収量に及ぼす施肥窒素の量効果を施肥時期別で比較すると、全量基肥では窒素 1 g m<sup>2</sup> の増肥で 26 g m<sup>2</sup> の増収であったが、追肥の場合は、窒素 1 g m<sup>2</sup> 増加するにつれて、茎立期 30 日前追肥では 45～46 g m<sup>2</sup> の増収が、茎立期 30 日前 3 g m<sup>2</sup> 追肥後の茎立期追肥では 41～56 g m<sup>2</sup> の増収が認められ、基肥よりも追肥の方が収量に対する窒素利用効率が高かった(第1図)。

子実粗蛋白質含有率に及ぼす追肥窒素の量効果を、影響が大きかった多収圃場で見ると、窒素 1 g m<sup>2</sup> 増加するにつれて、茎立期 30 日前追肥では 2.2 g kg<sup>-1</sup>(含有率 0.22%)の増加が、茎立期 30 日前 3 g m<sup>2</sup> 追肥後の茎立期追肥では 2.5 g kg<sup>-1</sup>(同 0.25%)の増加が認められた(第2図)。



第1図 施肥体系別の施肥窒素量と整粒重との関係(2018年度)

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。施肥水準は「基肥(硫安)」-「茎立期30日前追肥」-「茎立期追肥」で窒素量 g m<sup>2</sup> を表示。
- 2) 凡例は、上段:圃場区分, 中段:一次回帰式, 下段:決定係数を表示。エラーバーは標準誤差を表示。



第2図 施肥体系別の施肥窒素量と子実粗蛋白質含有率との関係(2018年度)

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。施肥水準は「基肥(硫安)」-「茎立期30日前追肥」-「茎立期追肥」で窒素量 g m<sup>2</sup> を表示。
- 2) 凡例は、上段:圃場区分, 中段:一次回帰式, 下段:決定係数を表示。エラーバーは標準誤差を表示。

以上の結果は基肥に速効性の硫安を用いた試験区から得られたものである。基肥に肥効調節型肥料の BB ビール麦エースを用いた試験区についてもほぼ同じ結果であった(データ省略)。

6. 場内における茎立期 30 日前および茎立期の生育量を用いた収量と子実粗蛋白質含有率の予測

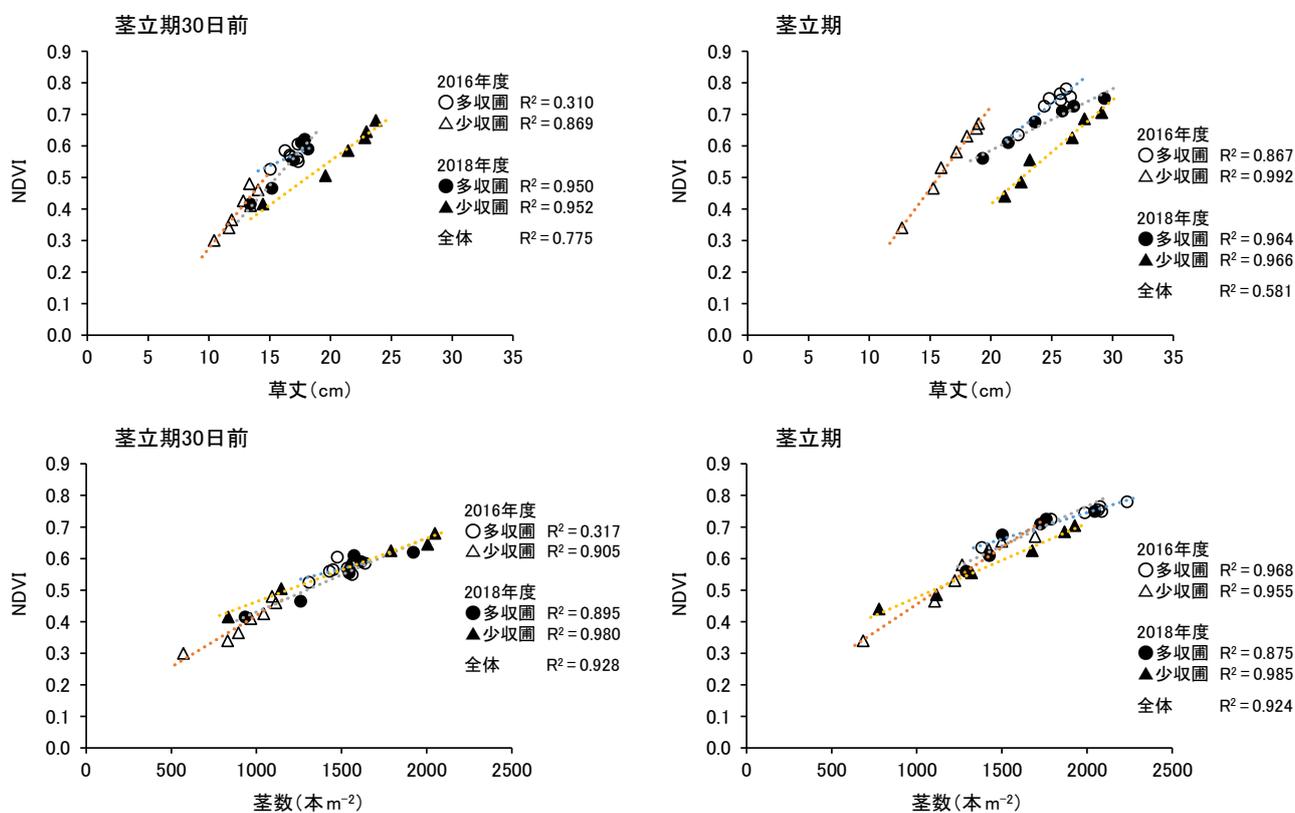
2016, 2018 年度の茎立期 30 日前および茎立期における形質(草丈, 茎数, NDVI, SPAD 値)間の相関関係を第 11 表

に示した。2016 年度では茎立期 30 日前, 茎立期ともに SPAD 値は草丈, 茎数, NDVI との間に強い正の相関を示したが, 2018 年度と 2 年間通してはほとんど相関が認められなかった。NDVI は, 草丈との間に 2016 年度では茎立期 30 日前, 茎立期ともに強い正の相関が, 2018 年度と 2 年間通しては茎立期 30 日前, 茎立期ともにやや強い相関が認められた。NDVI と茎数との間には, 最も強い相関が認められ( $R^2 > 0.9$ ), 年度, 測定時期にかかわらず 0.1% 水準で有意であった。つまり, 草丈および茎数は NDVI で代替できることが示された(第 3 図)。

第11表 茎立期30日前および茎立期における形質間相関(単回帰式,  $R^2$ )

年度	形質	茎立期30日前			茎立期		
		草丈	茎数	NDVI	草丈	茎数	NDVI
2016	草丈						
	茎数	0.925 ***			0.889 ***		
	NDVI	0.931 ***	0.945 ***		0.871 ***	0.934 ***	
	SPAD値	0.894 ***	0.850 ***	0.831 ***	0.638 ***	0.828 ***	0.850 ***
2018	草丈						
	茎数	0.613 **			0.762 ***		
	NDVI	0.706 ***	0.934 ***		0.618 **	0.904 ***	
	SPAD値	0.133	0.042	0.022	0.012	0.010	0.100
2016+2018	草丈						
	茎数	0.754 ***			0.617 ***		
	NDVI	0.775 ***	0.928 ***		0.581 ***	0.924 ***	
	SPAD値	0.087	0.003	0.009	0.003	0.184 *	0.247 **

- 1)  $R^2$ : 決定係数。\*\*\*, \*\*, \*: 各々0.1%, 1%, 5%水準で有意。
- 2) 基肥窒素(硫安)のみの試験区の少収・多収圃場を併せて計算。2016年度はn=14, 2018年度はn=12, 2年間はn=26。
- 3) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。



第3図 茎立期30日前および茎立期における草丈とNDVI, 茎数とNDVIとの関係

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 2) 全量基肥(硫安)の少収・多収圃場をプロット。

第12表には最終的な収量と茎立期30日前および茎立期の生育量(NDVI, SPAD値, NDVIとSPAD値の積)との間の相関関係を示した。茎立期の整粒重予測は、2年間通しで見ると、NDVI ( $R^2=0.80$ ,  $RMSEP=94\text{g m}^{-2}$ ) および NDVI と SPAD 値の積 ( $R^2=0.91$ ,  $RMSEP=64\text{g m}^{-2}$ ) で高い精度を示した。一方、これらの指標値による茎立期30日前の整粒重予測(2年間通し)の精度は一樣に低下したが、NDVI と SPAD 値の積では、比較的強い相関を示した ( $R^2=0.66$ ,  $RMSEP=121\text{g m}^{-2}$ )。

整粒重の予測は、NDVI 単独に比べて NDVI を GDD で除した値を使用すると、概ね改善が認められた。茎立期30日前での予測では  $R^2$  が 0.26 から 0.66 に向上し ( $RMSEP$  は  $122\text{g m}^{-2}$  に改善)、茎立期での予測でも  $R^2$  が 0.80 から 0.83 に向上した ( $RMSEP$  は 94 から  $87\text{g m}^{-2}$  に改善)。また、SPAD 値を乗じる場合では、NDVI 単独に比べて NDVI/GDD の使用は、茎立期における予測では  $R^2$  が 0.91 から 0.80 に低下したが ( $RMSEP$  は 64 から  $94\text{g m}^{-2}$  に改悪)、茎立期30日前における予測では  $R^2$  が 0.66 から 0.71 に向上した ( $RMSEP$  は 121 から  $112\text{g m}^{-2}$  に改善)。

茎立期30日前および茎立期の NDVI, SPAD 値と収量構成要素との相関関係を第13表に示した。2年間通しで見ると、NDVI は穂数と強く相関し、茎立期30日前の  $R^2$  が 0.63、茎立期の  $R^2$  が 0.80 であった(第4図参照)。NDVI/GDD と穂数との間にも同様の傾向があり、茎立期30日前、茎立期ともに  $R^2$  が 0.44 であった。しかしながら、NDVI および NDVI/GDD と千粒重との間には強い関連性は認められなかった。一方、SPAD 値は千粒重との間に相関関係が認められ、茎立期30日前の  $R^2$  が 0.54、茎立期の  $R^2$  が 0.63 であった(第4図参照)。しかし、穂数との間には強い関連性が見られなかった。また、SPAD 値は1穂粒数との間にも相関が認められ、茎立期30日前の  $R^2$  が 0.62、茎立期 SPAD 値の  $R^2$  が 0.56 であった。

第14表には最終的な子実粗蛋白質含有率と茎立期30日前および茎立期の生育量(NDVI, SPAD 値, NDVI と SPAD 値の積)との間の相関関係を示した。茎立期における子実粗蛋白質含有率の予測は、NDVI と SPAD 値の積のみが比較的高い精度を示した ( $R^2=0.57$ ,  $RMSEP=0.42\%$ )。茎立期30日前においては高精度で予測できる形質はなかった。

第12表 茎立期30日前および茎立期の各形質と整粒重との間の相関関係 ( $R^2$  および  $RMSEP$ )

生育時期	形質	2016年度		2018年度		2016年度+2018年度	
		$R^2$		$R^2$		$R^2$	$RMSEP (\text{g m}^{-2})$
茎立期30日前	NDVI (A)	0.709 ***		0.408 *		0.255 **	-
	SPAD値 (B)	0.693 ***		0.645 **		0.631 ***	127
	A × B	0.728 ***		0.790 ***		0.664 ***	121
	NDVI/GDD-1 (A')		(Aと同じ)			0.658 ***	122
	A' × B		(A × Bと同じ)			0.712 ***	112
茎立期	NDVI (C)	0.841 ***		0.935 ***		0.796 ***	94
	SPAD値 (D)	0.865 ***		0.212		0.520 ***	145
	C × D	0.892 ***		0.890 ***		0.905 ***	64
	NDVI/GDD-2 (C')		(Cと同じ)			0.827 ***	87
	C' × D		(C × Dと同じ)			0.797 ***	94

- 1)  $R^2$ : 単回帰式の決定係数。\*\*\*, \*\*, \*: 各々0.1%, 1%, 5%水準で有意。
- 2)  $RMSEP$ (root mean square error of prediction): 予測値標準偏差。
- 3) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 4) 基肥窒素(硫酸)のみの試験区の少収・多収圃場を併せて計算。2016年度は $n=14$ 、2018年度は $n=12$ 、2年間は $n=26$ 。
- 5)  $A \times B$ はNDVI(A)とSPAD値(B)の積を表す。 $A' \times B$ ,  $C \times D$ ,  $C' \times D$ も同様に各々の値の積を表す。
- 6) GDD(growing degree days): 有効積算温度(Raun *et al.*, 2001)。  
GDD-1は出芽から茎立期30日前までのGDD、GDD-2は出芽から茎立期までのGDD。

第13表 茎立期30日前および茎立期の各形質と収量構成要素との間の相関関係(単回帰式,  $R^2$ )

生育時期	形質	穂数			1穂粒数			千粒重		
		2016年度	2018年度	2年間	2016年度	2018年度	2年間	2016年度	2018年度	2年間
茎立期30日前	NDVI (A)	0.757 ***	0.568 **	0.626 ***	0.007	0.259	0.030	0.122	0.030	0.208 *
	SPAD値	0.733 ***	0.450 *	0.221 *	0.014	0.596 **	0.622 ***	0.093	0.737 ***	0.539 ***
	NDVI/GDD-1		(Aと同じ)	0.441 ***		(Aと同じ)	0.307 **		(Aと同じ)	0.141
茎立期	NDVI (B)	0.800 ***	0.869 ***	0.795 ***	0.126	0.817 ***	0.151	0.025	0.196	0.013
	SPAD値	0.780 ***	0.085	0.128	0.236	0.137	0.561 ***	0.005	0.751 ***	0.634 ***
	NDVI/GDD-2		(Bと同じ)	0.436 ***		(Bと同じ)	0.544 ***		(Bと同じ)	0.325 **

- 1)  $R^2$ : 決定係数。\*\*\*, \*\*, \*: 各々0.1%, 1%, 5%水準で有意。
- 2) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 3) 基肥窒素(硫酸)のみの試験区の少収・多収圃場を併せて計算。2016年度は $n=14$ 、2018年度は $n=12$ 、2年間は $n=26$ 。
- 4) GDD(growing degree days): 有効積算温度(Raun *et al.*, 2001)。  
GDD-1は出芽から茎立期30日前までのGDD、GDD-2は出芽から茎立期までのGDD。

NDVI の代わりに NDVI/GDD を用いると、子実粗蛋白質含有率の予測精度においても収量予測と同様に概ね改善が認められた。茎立期 30 日目の予測は有用なレベルまで達しなかったが、茎立期の予測では  $R^2$  が 0.25 から 0.52 に向上した (RMSEP は 0.44% に改善)。SPAD 値を乗じる場合の NDVI/GDD の使用は NDVI 単独に比べて、茎立期の予測では  $R^2$  が 0.57 から 0.54 にやや低下したが (RMSEP は 0.42 から 0.43% にやや改悪)、茎立期 30 日目の予測では  $R^2$  が 0.33 から 0.40 に向上した (RMSEP は 0.49% に改善)。

以上の結果は基肥に硫安を用いた全量基肥の試験区から得られたものである。2018 年度の単年度結果であるが、肥効調節型肥料の BB ビール麦エースを基肥に施用した試験区でもほぼ同様の結果が得られた (データ省略)。

#### IV 考察

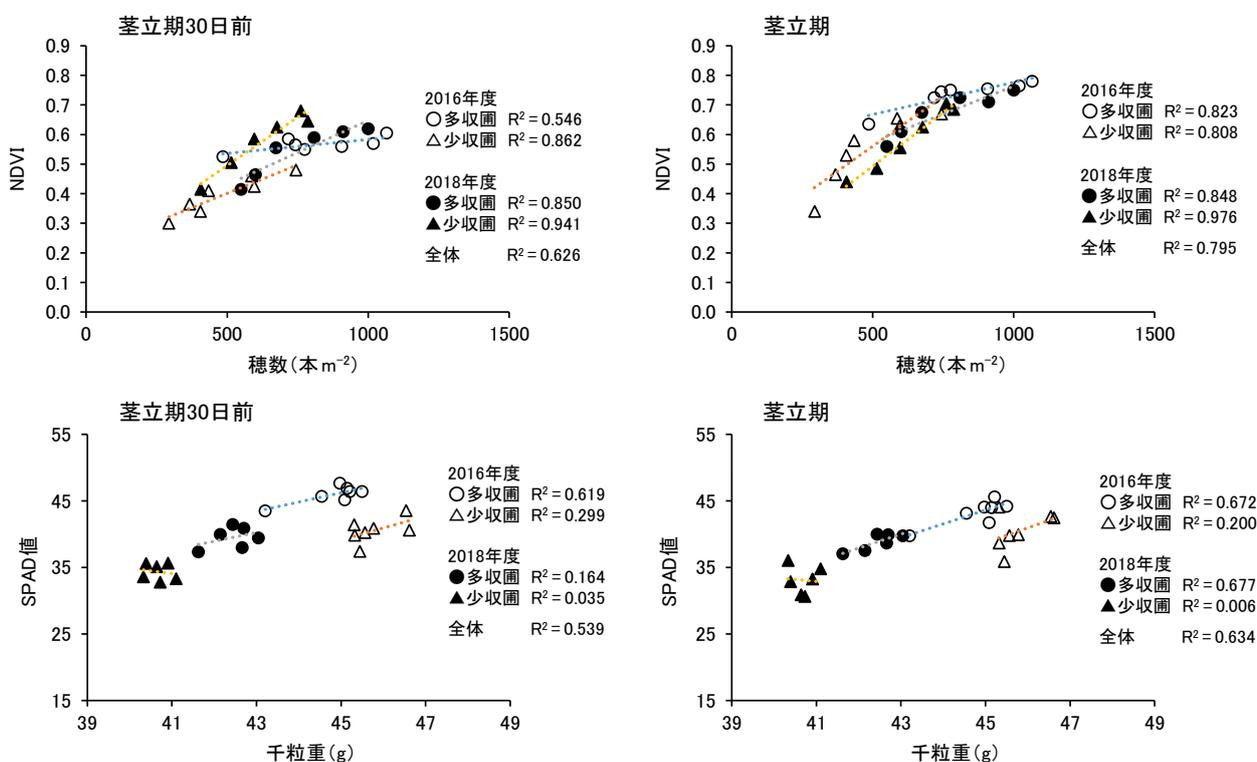
##### 1. 現地の多収阻害要因は湿害と肥料不足

県内現地の生産状況を2か年にわたり調査した結果、多収を阻害している主な要因は湿害と施肥量不足であることがクローズアップされた。土壌排水性に関して、生産者は少収圃場を多収圃場よりも「劣る」と評価し、湿害や枯れ熟れが多く発生していることを認識しているが、額縁明渠や弾丸暗渠などの排水対策をより多く施用しているわけではないことが明らかとなった (第5表)。したがって、少収圃場では現状よりも多

くの排水対策を講じることが出来れば、湿害、枯れ熟れ、雑草害などが緩和され、収量の向上が期待できると考えられた。

次に肥料不足に関する改善の可能性を考察する。ビール用二条オオムギは、実需者であるビール会社から均一かつ優れた品質の安定生産が望まれている。特にビール醸造品質に影響を及ぼす子実粗蛋白質含有率については、10.0～11.0%の範囲に収めることが求められており、9.0～12.0%が許容範囲とされている (条川ら, 2004)。子実粗蛋白質含有率が高過ぎると、麦芽エキスの低下や麦芽の溶け不足を引き起こすと同時に、ビール醸造過程で溶出する蛋白質が多くなり、濁りや香味悪化の原因になる。逆に子実粗蛋白質含有率が低過ぎると、泡もちの低下、酵母の働きが鈍ることによる発酵遅延等の問題が生じる (福嶋, 2000)。本県では従来から子実粗蛋白質含有率が高すぎて問題となることが多かったので (倉井ら, 1990)、生産者別の子実粗蛋白質含有率分析による生産現場の実態把握を行い、分析結果に基づいた施肥を奨励し、追肥は原則禁止している。

聞き取り調査の結果、生産者は肥沃度に関して少収圃場は多収圃場に比べて「低い」と評価しているにもかかわらず、基肥窒素量を少収圃場よりも多く施用している例はほとんど見られないことが判った (第5表)。また、聞き取り調査によると、基肥窒素量は灰色低地土では 6.8～6.9g m<sup>2</sup>、黒ボク土では 5.9～6.0g m<sup>2</sup> であり (第5表)、「ニューサチホゴールド」の



第4図 茎立期30日前および茎立期におけるNDVI, SPAD値と収量構成要素(穂数および千粒重)との関係

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールド。
- 2) 全量基肥(硫安)の少収・多収圃場をプロット。

推奨量である 8.0g m<sup>-2</sup>(大山ら, 2017)よりも少ないことが判明した。基肥窒素が少ないのは高蛋白質化を回避するための予防線と想像されるが、少収圃場のみならず多収圃場でも施肥窒素不足の傾向があるので、施肥量の適正化による収量向上の余地は大きいと考えられた。

## 2. 基肥窒素増量で多収化と子実粗蛋白質含有率の適正化の両立が可能か？

場内において、「ニューサチホゴールド」の収量と品質の高位安定化を目的に基肥窒素に対する生育、収量、子実粗蛋白質含有率等の反応について調査した。結論として、全量基肥とする場合の窒素成分(多収圃場)は、現行よりも多い 10g m<sup>-2</sup>を基本とすることを提案する。

1990年以降の県内主要品種の基肥窒素の推奨量を見ると、子実粗蛋白質含有率が比較的高くなりやすい「ミカモゴールド」では水稲跡ドリル播栽培で 5.0~6.0g m<sup>-2</sup>とし(五月女ら, 1999)、「スカイゴールド」でも子実粗蛋白質含有率が比較的高くなりやすいことから 5.5~6.5g m<sup>-2</sup>とした(山口ら, 2004)。耐倒伏性が比較的優れ、子実粗蛋白質含有率が高くなりくい「サチホゴールド」では 6.5~7.5g m<sup>-2</sup>としたが(渡邊ら, 2007)、「ニューサチホゴールド」ではそれを上方修正して 8.0g m<sup>-2</sup>とした(大山ら, 2017)。

試験した 3 か年において、多収圃場では基肥窒素量を多くするほど、主に穂数の増加に依存して整粒重が増加した(第7表)。2017年度では窒素水準が高いところでは収量向上が鈍化したが、2016および2018年度では窒素量 15~16g m<sup>-2</sup>の水準までほぼ直線的に増収した。一般に多肥にすると倒伏と子実粗蛋白質の高含有率化が懸念される。倒伏については、全般的に穂数多の生育となった2018年度では12および15g m<sup>-2</sup>区で“微”程度に発生した。また、倒伏は発生しな

かったが、2016年度の16g m<sup>-2</sup>区では倒伏の危険度が増すレベルの稈長 95cm、穂数 1000本 m<sup>-2</sup>を超越した。一方、子実粗蛋白質含有率については、多収圃場のすべての試験区で許容範囲上限の 12.0%を下回った。しかしながら、2016年度の12および16g m<sup>-2</sup>区、2017年度の15g m<sup>-2</sup>区では11%台となり、目標範囲の 10.0~11.0%を超過した。これらのことから、多収圃場では全量基肥とする場合の基肥窒素は 10g m<sup>-2</sup>が適正で、多くても 12g m<sup>-2</sup>までと判断された。

一方、少収圃場では3か年ともに基肥窒素量を多くするほど、穂数および1穂粒数の増加に依存して整粒重が増加した(第7表)。多収圃場と同様に2017年度では窒素水準が高いところでは収量向上が鈍化したが、2016および2018年度では窒素 15~16g m<sup>-2</sup>の水準までほぼ直線的に増収した。倒伏は設定水準の上限(窒素 20g m<sup>-2</sup>)でも観察されなかった。子実粗蛋白質含有率は、2017年度では0g m<sup>-2</sup>区でも許容範囲上限の 12.0%に達したが、他の2か年ではほぼ 9.0~11.0%の範囲内で変動し、基肥窒素量との間に明確な関係性が見られなかった。今回の試験から少収圃場における全量基肥の場合の基肥窒素量の適正值を定めることは困難であるが、少なくとも 16g m<sup>-2</sup>以上であることが示唆された。

大山ら(2017)は「ニューサチホゴールド」の施肥反応を調査し、窒素 8g m<sup>-2</sup>に比べて 6g m<sup>-2</sup>では穂数不足により少収となり、10g m<sup>-2</sup>、12g m<sup>-2</sup>と増肥するほど増収するが、倒伏や高蛋白質化を懸念して 10g m<sup>-2</sup>が適正とし、試験圃場の低地力を勘案し、現場では窒素 8g m<sup>-2</sup>が望ましいレベルであると報告した。本研究では、前述したように少収圃場だけでなく多収圃場においても現行推奨の窒素 8g m<sup>-2</sup>よりも多い水準が適量であると結論した。生産現場で多収性が十分発揮されていない現状や、最近では低蛋白質化が問題視されていることを踏まえると、現行よりも多肥を推奨できると考えられた。特に、収量の

第14表 茎立期30日前および茎立期の各形質と子実粗蛋白質含有率との間の相関関係(R<sup>2</sup>およびRMSEP)

生育時期	形質	2016年度	2018年度	2016年度+2018年度	
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	RMSEP (%)
茎立期30日前	NDVI (A)	0.245	0.350 *	0.070	-
	SPAD値 (B)	0.312 *	0.204	0.286 **	-
	A × B	0.328 *	0.473 *	0.329 **	-
	NDVI/GDD-1 (A')		(Aと同じ)	0.336 **	-
	A' × B		(A × Bと同じ)	0.403 ***	0.49
茎立期	NDVI (C)	0.366 *	0.606 **	0.254 **	-
	SPAD値 (D)	0.388 *	0.000	0.296 **	-
	C × D	0.479 **	0.770 ***	0.571 ***	0.42
	NDVI/GDD-2 (C')		(Cと同じ)	0.521 ***	0.44
	C' × D		(C × Dと同じ)	0.538 ***	0.43

1) R<sup>2</sup>: 単回帰式の決定係数。\*\*\*, \*\*, \*: 各々0.1%, 1%, 5%水準で有意。

2) RMSEP(root mean square error of prediction): 予測値標準偏差。

3) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールド。

4) 基肥窒素のみの試験区の少収・多収圃場を併せて計算。2016年度はn=14, 2018年度はn=12, 2年間はn=26。

5) A × BはNDVI(A)とSPAD値(B)の積を表す。A' × B, C × D, C' × Dも同様に各々の値の積を表す。

6) GDD(growing degree days): 有効積算温度(Raun *et al.*, 2001)。

GDD-1は出芽から茎立期30日前までのGDD, GDD-2は出芽から茎立期までのGDD。

向上と子実粗蛋白質含有率の適正化の両立を図るためには、圃場の収量レベルに応じた施肥量の設定が重要であると考えられた。ただし多肥栽培は、内外穎成長期(3月中旬から4月中旬)に低温に遭遇すると、その後の子実成長とのバランスが崩れて側面裂皮粒の発生が多くなるので(渡邊ら, 2007)、適期播種や湿害対策を疎かにしてはならない。

### 3. 茎立期 30 日前および茎立期の追肥で効率的に多収化と子実粗蛋白質含有率の適正化を実現できる

場内において、「ニューサチホゴールデン」の収量と子実粗蛋白質含有率の更なる安定化を目指して、追肥の時期と窒素量に対する反応について調査した。結論として、施肥体系は基肥窒素量を抑制し、茎立期 30 日前追肥や、茎立期 30 日前と茎立期の両方に必要な量の追肥を行う分施を推奨する。具体的には、少収圃場では 3-12-0 あるいは 3-9-3、多収圃場では 3-9-0 あるいは 3-6-3 が望ましい分施体系と考えられた。

分施体系を推奨する第一の理由として、収量に対する窒素利用効率が基肥よりも追肥(茎立期 30 日前、茎立期 30 日前および茎立期)の方が高いことが挙げられる(第1図)。同様の結果は食用オオムギ「もち絹香」でも認められている(塚原ら, 2020)。また、少収圃場の総窒素施肥量  $15\text{g m}^{-2}$ 、多収圃場の総窒素施肥量  $12\text{g m}^{-2}$  において(全量基肥の場合、少収圃場では  $16\text{g m}^{-2}$  以上が、多収圃場では  $10\sim 12\text{g m}^{-2}$  が適量と考察)、全量基肥と分施体系を比較すると、分施体系の方が多収になり、さらに子実粗蛋白質の低含有率が改善されて目標値( $10.0\sim 11.0\%$ )に収まる結果となった(第9表)。Raun and Johnson(1999)によると、穀物生産では施用した窒素肥料のうち、作物に回収される窒素は平均 33%である。そのため、施用する窒素と作物が要求する窒素の量やタイミングを同調させ、浸透、脱窒、揮発、土壌への固定等の窒素損

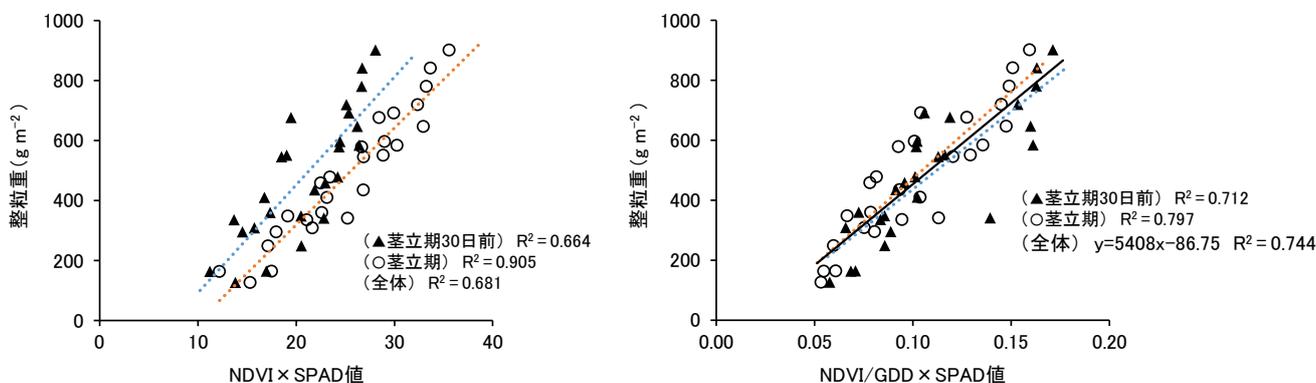
失を少なくすることが、環境保全と経済効率の両面から重要であると指摘されている(Sharma and Bali, 2018)。

追肥時期に関しては、茎立期 30 日前や、茎立期 30 日前と茎立期の両方に適正量の追肥を行うことが収量改善に有効であることが示された(第8表)。ただし留意点として、基肥窒素を最小限に抑えた場合、茎立期の追肥は単独で行わずに、茎立期 30 日前追肥と併用すべきであることを強調する。なぜならば、茎立期 30 日前の追肥を省き、茎立期に多めの追肥(窒素  $9\text{g m}^{-2}$  以上)を行うと、少収圃場では生育量および収量の改善がほとんど見られず、一方、多収圃場では収量は向上するが、遅れ穂発生による穂数過剰を招き、マイナスの影響の方が大きいからである。

分施体系内の比較(少収圃場の総窒素施肥量  $15\text{g m}^{-2}$ 、多収圃場の総窒素施肥量  $12\text{g m}^{-2}$ )では、収量には差が無かったが、茎立期への追肥に重点を置くほど小粒になり、倒伏発生リスクが高くなるので(第9表)、少収圃場での 3-3-9 や多収圃場での 3-3-6 は回避すべきで、望ましい分施体系としては、少収圃場では 3-12-0 あるいは 3-9-3、多収圃場では 3-9-0 あるいは 3-6-3 と考えられた。

分施体系を推奨する第二の理由は、生育が劣る場合でも茎立期 30 日前に十分量の追肥を行えば、生育の回復、ひいては収量の改善が期待できることである。基肥窒素を  $3\text{g m}^{-2}$  に抑えた場合、茎立期 30 日前に  $9\text{g m}^{-2}$  追肥すると、収量が少収圃場では追肥無しの 3.8 倍に、多収圃場では 2.1 倍に増加した。このときの子実粗蛋白質含有率は、少収圃場ではほとんど増加せず、多収圃場では 9.6%から 10.5%への増加にとどまった(第10表)。

本県の麦作は肥効調節型肥料を使用した全量基肥栽培が主流であるが、温暖化や多雨等の気候変動により、緩効性窒素の溶出パターンや溶出量が不安定になる恐れがある。気候変動の環境下においても収量と品質の安定化を図るた



第5図 NDVIとSPAD値の積およびNDVI/GDDとSPAD値の積による整粒重の予測

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールデン。
- 2) 2016年度、2018年度の全量基肥(硫安)の少収・多収圃場をプロット。
- 3) GDD (growing degree days): 出芽から茎立期30日前または茎立期までの有効積算温度(Raun et al., 2001)。
- 4) NDVI x SPAD値: NDVIとSPAD値の積, NDVI/GDD x SPAD値: NDVI/GDDとSPAD値の積。

めには、作物の診断と施肥体系を組合せた技術の確立が急務と考える。

#### 4. 茎立期 30 日前および茎立期の生育量で追肥可否を判断できるか？

追肥可否の診断基準を確立するために、茎立期 30 日前および茎立期の生育量を指標にして収量および子実粗蛋白質含有率を予測できるか可能性を検討した。その結果、暫定的ではあるが次のとおり可能であると判断された。

茎立期 30 日前と茎立期に NDVI/GDD と SPAD 値の積を指標に収量と子実粗蛋白質含有率を予測し(収量は第5図右, 粗蛋白質含有率は第6図右), 目標収量と目標粗蛋白質含有率を各々  $700 \text{ g m}^{-2}$ , 10.5 % に設定し, それらに足りない場合は追肥を行う。増収効果は, 茎立期 30 日前の追肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たりで  $45 \sim 46 \text{ g m}^{-2}$ , 茎立期の追肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たりで  $41 \sim 56 \text{ g m}^{-2}$  と見込まれる(第1図)。ただし, 子実粗蛋白質濃度が茎立期 30 日前の追肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たりで  $2.2 \text{ g kg}^{-1}$ , 茎立期の追肥では窒素  $1 \text{ g m}^{-2}$  当たりで  $2.5 \text{ g kg}^{-1}$  増加することに留意する(第2図)。

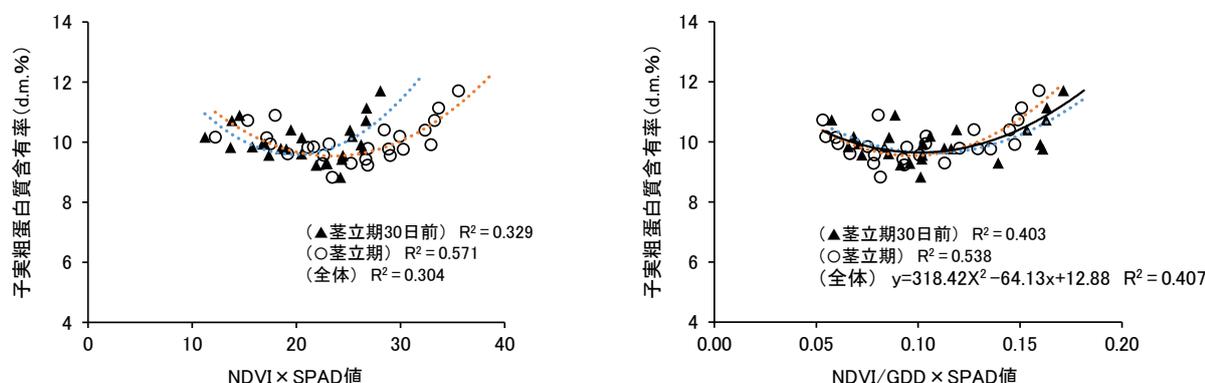
収量の予測は, NDVI を単独で用いるよりも NDVI に SPAD 値を乗じた値を用いる方が茎立期 30 日前と茎立期のいずれにおいても, ほとんどのケースで精度が高まった(第 12 表)。植物成長時の NDVI と SPAD 値のパターンは本質的に異なることが知られており(Shibayama *et al.*, 2012), 両者の積は, シンク能とソース能の合理的な説明が可能になると考えられた。Edalat *et al.*(2019)は, NDVI と SPAD 値の組合せは, トウモロコシの窒素状態を管理し, 収量を予測するための指標になる可能性があるとして述べている。NDVI は茎数や草丈などバイオマスとの相関が強いことが報告されており(Moges *et al.*, 2004; Cabrera-Bosquet *et al.*, 2011), 本研究においても NDVI は, 茎数および草丈と強く相関し(第3図), 収量構成要素で

ある穂数の決定に寄与した(第4図)。しかし, 千粒重との関連性は見られなかった(第 13 表)。一方, SPAD 値は葉のクロロフィル含有量の簡易測定値であり(Uddling *et al.*, 2007; Shah *et al.*, 2017), 葉の窒素含有量や Rubisco (リブローズ-1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ)活性に影響を及ぼすことが知られている(Evans, 1989)。本研究では収量構成要素の千粒重および1穂粒数の決定に貢献した。しかし, 穂数との関係は見られなかった(第4図, 第 13 表)。

我々は今回, NDVI と SPAD 値を異なる機器で測定したが, 追肥判断のツールとしては, 正確性の他に簡易で迅速であることが求められることから, 今後はマルチスペクトルカメラの活用が望まれる。クロロフィル含有量はレッドエッジ波長(700nm)または緑波長(550nm)の反射率と近赤外波長の反射率の比と正比例する(Gitelson and Merzlyak, 1998)。よって今後は, SPAD 値に替わるレッドエッジ波長と緑波長の反射率と, NDVI 算出のための赤波長(670nm)と近赤外波長(780nm)の反射率を同時に測定できるマルチスペクトルカメラが有用なツールになるであろう。

NDVI は, 測定感度の問題で植物が一定量のバイオマスを超えると飽和することが知られている(Li *et al.*, 2010; Cao *et al.*, 2016)。トウモロコシやイネではレッドエッジ波長による NDRE や緑波長による GNDVI など, NDVI とは異なる植生指数を使用して飽和の問題を解決し, 収量の予測精度を向上させている(Shanahan *et al.*, 2001; Sharma and Franzen, 2014; Zhang *et al.*, 2019)。また, レッドエッジ波長の反射率が葉面積指数を評価できる特性を利用し(Horler *et al.*, 1983), NDVI と葉面積指数の組合せによってジャガイモの収量予測を改善させた事例もある(Sharma *et al.*, 2017)。オオムギでも最適な波長のスクリーニングや複数の植生指数を組合せることにより, 更なる精度向上が期待できると考える。

NDVI 等の植生指数を直接使用した収量予測は, 特定の



第6図 NDVIとSPAD値の積およびNDVI/GDDとSPAD値の積による子実粗蛋白質含有率の予測

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールド。
- 2) 2016年度, 2018年度の全量基肥(硫安)の少収・多収圃場をプロット。
- 3) GDD (growing degree days): 出芽から茎立期30日前または茎立期までの有効積算温度(Raun *et al.*, 2001)。
- 4) NDVI × SPAD値: NDVIとSPAD値の積, NDVI/GDD × SPAD値: NDVI/GDDとSPAD値の積。

地域や年次では有効であるが、異なる地域や複数の年次でも使用できるようにするには再調整する必要がある(Xuc *et al.*, 2014). そのための手段として、環境変動を補完するデータの取り込みが最重要であると考えられる。再調整の一例として、NDVI を GDD で除算する方法が提唱されている(Raun *et al.*, 2001, 2002). GDD による調整は、NDVI 測定時期のばらつきを排除する効果があるので、特に時期の特定が困難な茎立期 30 日前の予測には有効であると考えられる。我々の結果では、NDVI 単独に比べて NDVI/GDD を使用する方が、ほとんどのケースで予測精度の改善が認められた(第 12 表)。

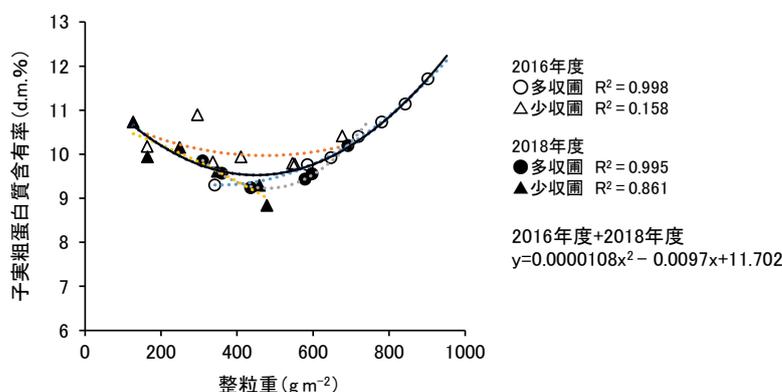
環境変動を補完する他の手法として、Walsh *et al.* (2013) は、節間伸長前の NDVI に、土壌水分を計算に組み込むことにより、異なる産地および年次を込みにした場合でも高い精度でコムギの収量を予測できることを報告している。また、Sharma and Franzen (2014) は、異なる土性を分割して収量予測モデルを構築した。今後、県内現地のケーススタディにおいて検討すべき項目と考える。

ビール用オオムギの生育診断にとって、子実粗蛋白質含有率の予測は重要事項であるが、収量予測よりも難しいだろう。なぜならば、子実粗蛋白質含有率は、茎葉の窒素同化能、子実への窒素転流能、子実中の窒素化合物含有量と子実サイズ(粒重)の比などによって決定され、より複雑になるからである。子実粗蛋白質含有率を予測する上で、粗蛋白質含有率の適正化と収量の高位安定化の両立を図るために収量との関係を見ておく必要がある。本研究においては、両者の関係は低収ゾーンでは負の相関関係になる一方で、高収ゾーンでは正の相関になった(第7図)。Zhou *et al.* (2020) はイネで同様の現象を認めており、低収ゾーンでの負の相関は非窒素化合物による窒素化合物の希釈効果に起因し(Kibite and Evans, 1984)、高収ゾーンでの正の相関は収量レベルより多い窒素の同化と子実への窒素転流に起因する(Cox *et al.*, 1986)と述べている。前述のとおり、NDVI と SPAD 値の積また

は NDVI/GDD と SPAD 値の積は収量と直線的に相関しているので(第5図)、子実粗蛋白質含有率との関係は、NDVI と SPAD 値の積または NDVI/GDD と SPAD 値の積が一定水準までは負の相関になり、それを超えると正の相関になった(第6図)。ただし、この関係が異なる地域や年次でどのように変化して、モデル式の普遍性に影響を与えるかを評価するためには、多くのケーススタディが必要である。

Matsunaka *et al.* (1997) は止葉展開期の止葉の次葉の SPAD 値でコムギの子実粗蛋白質含有率を予測できると報告している。糸川ら(2004)は茎立期 20 日後の最上位完全展開葉の SPAD 値を用いた場合、オオムギの子実粗蛋白質含有率の予測が可能であるが、茎立期では精度が著しく低くなることを報告している。本研究では茎立期 30 日前および茎立期の SPAD 値による推定を試みたが精度は低かった(第 14 表)。よって、この時期の SPAD 値単独では、前述したように多数の要素が関与する子実粗蛋白質含有率を予測することは困難と考えられた。

生育期の子実粗蛋白質含有率の予測に関しては、Apan *et al.* (2006) と Tan *et al.* (2020) の研究が特筆される。Apan *et al.* (2006) はハイパースペクトルデータ(反射率)の PLS 回帰により、近赤外波長を含む 5 波長の回帰モデルを開発し、コムギ生育中期に子実粗蛋白質含有率を高精度 ( $R^2=0.92$ , RMSEP=0.5%) で予測した。Tan *et al.* (2020) は 14 の植生指数の PLS 回帰を行い、NDVI, SIPI, PSRI, EVI の 4 植生指数(反射率測定波長は青、緑、赤、近赤外)のモデルを開発し、コムギ開花期に子実粗蛋白質含有率を  $R^2=0.80$ , RMSEP=0.54% の精度で予測した。本研究では茎立期の NDVI と SPAD 値の積または NDVI/GDD と SPAD 値の積を用いて  $R^2=0.54\sim 0.57$  の精度で予測できたが(第 14 表)、今後は収量の予測精度向上と同様に、マルチスペクトルカメラを用いて複数の植生指数による最適な組合せをスクリーニングする必要があると考える。



第7図 整粒重と子実粗蛋白質含有率との関係

- 1) 場内黒ボク土圃場。品種はニューサチホゴールド。
- 2) 2016年度、2018年度の全量基肥(硫安)の少収・多収圃場をプロット。

子実粗蛋白質含有率の予測において環境変動を補完するために、登熟期の日射量(Hama *et al.*, 2020), 生育期間の降水量(Macnack *et al.*, 2014), 出穂前1か月の気温, 降水量および日射量(Li *et al.*, 2018)を計算に組み込んだ事例があるが、茎立期までの予測に組み込む変数としては、播種日(Perrerson and Eckersten, 2007)が現実的であろう。なぜならば、植生指数と播種日から構築されたモデルに、独立変数として登熟期間の環境因子を追加しても予測精度の改善が見られないので(Perrerson and Eckersten, 2007), 播種日は登熟条件を反映するパラメーターとして期待できるからである。

反射率の測定方法の検討も成功への重要なカギになる。今回はハンディタイプのセンサーを用いた。しかし、試験区全体の生育が反映されなかったケースが無いとも限らない。生産現場で応用する場合には圃場が大区画になるので尚更である。今後、ドローンを活用した測定や衛星データを活用することにより、精細なデータ取得が可能になると考える。

本研究では、生育期における収量と子実粗蛋白質含有率の予測の可能性が示されたが、堅牢性に優れるモデルにするには、これまで述べてきたとおり未だ改善すべき点が多い。今後、窒素施肥の最適化、窒素利用効率の向上、収量・品質の高位安定化を通して、農家の純利益の増加をもたらすために、最適な植生指数のスクリーニングと併せて、天候、土壌、栽培様式等のオオムギの収量や子実粗蛋白質含有率に影響を与える要因を考慮して、研究をさらに進める必要がある。

## 謝辞

各農業振興事務所経営普及部の作物担当普及指導員各氏ならびに経営技術課の麦作担当革新支援専門員の渡邊浩久氏(現農業試験場)には現地試験の生産者聞き取り調査、生育調査および収量調査において多大なるご尽力をいただいた。当試験場の技術員諸氏には試験圃場管理、品質分析等において多大なる協力をいただいた。また、パート職員には調査補助に協力していただいた。関係各位に心から感謝申し上げます。

## 引用文献

Apan A., Kelly R., Phinn S., Strong W., Lester D., Butler D., Robson A. (2006) Predicting grain protein content in wheat using hyperspectral sensing of in-season crop canopies and partial least squares regression. *Int. J. Geoinf.* 2: 93-108

新井友輔・山口昌宏・大山亮・大関美香・関和孝博・五月女敏範・加藤常夫 (2018) 抵抗性遺伝子 *rym1* から *rym15* を有するオオムギの BaYMV 系統に対する評価とその利用. 栃木農試研報 77: 1-12

Cabrera-Bosquet L., Molero G., Stellacci A. M., Bort J., Nogués S., Araus J. L. (2011) NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Res. Commun.* 39: 147-159

Cao Q., Miao Y., Shen J., Yu W., Yuan F., Cheng S., Huang S., Wang H., Yang W., Liu F. (2016) Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. *Precision Agric.* 17: 136-154

Cox M. C., Qualset C. O., Rains D. W. (1986) Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. III. Nitrogen translocation in relation to grain yield and protein. *Crop Sci.* 26: 737-740

Edalat M., Naderi R., Egan T. P. (2019) Corn nitrogen management using NDVI and SPAD sensor-based data under conventional vs. reduced tillage systems. *J. Plant Nutr.* 42: 2310-2322

Evans J. R. (1989) Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C<sub>3</sub> plants. *Oecologia* 78: 9-19

福嶋禎久 (2000) 醸造の基本技術—大麦・麦芽(1). 日本醸造協会誌 95: 395-403

Gitelson A. A., Merzlyak M. N. (1998) Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances Space Res.* 22: 689-692

Hama A., Tanaka K., Mochizuki A., Tsuruoka Y., Kondoh A. (2020) Estimating the protein concentration in rice grain using UAV imagery together with agroclimatic data. *Agronomy* 10: 431 Doi: 10.3390/agronomy10030431

Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. (1983) The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 4: 273-288

加藤常夫・長嶺敬・糸川晃伸・山口恵美子・大野かおり・渡辺浩久・大関美香・関和孝博・渡邊修孝・谷口義則・山口昌宏・大塚勝・小田俊介・常見讓史・五月女敏範・加島典子・仲田聡・河田尚之・石川直幸・小玉雅晴・野沢清一・福田暎・佐藤圭一・早乙女和彦・徳江紀子・宮川三郎・神永明 (2006) 二条大麦新品種「サチホゴールデン」の育成 (二条大麦農林22号). 栃木農試研報 58: 59-77

河田尚之・石川直幸・福田暎・早乙女和彦・加藤常夫・五月女敏範・大塚勝・徳江紀子・宮川三郎・神永明・佐々木昭博・桐生光広・伊藤浩・吉田久・田谷省三・天谷正行・小林俊一・瀬古秀文・藤井敏男・小松田美津留・氏原和人・関口忠男・倉井耕一 (1995) 二条大

- 麦新品種「タカホゴールド」の育成 (二条大麦農林16号). 栃木農試研報43:107-126
- Kibite S., Evans L. E. (1984) Causes of negative correlations between grain yield and grain protein concentration in common wheat. *Euphytica* 33:801-810
- 桑川晃伸・谷口義則・山口昌宏・渡邊修孝・山口恵美子・関和孝博・加藤常夫 (2004) ビール大麦への追肥が収量と麦芽品質に及ぼす影響. 栃木農試研報53:27-34
- 倉井耕一・藤井敏男・米内貞夫・湯沢正明・前波健二郎・石川成寿 (1990) 実態調査から見たビール麦の栽培条件と粗蛋白含量. 栃木農試研報37:10-24
- Li F., Miao Y., Chen X., Zhang H., Jia L., Bareth G. (2010) Estimating winter wheat biomass and nitrogen status using an active crop sensor. *Intelligent Automation Soft Comput.* 16:1219-1228
- Li Zhenhai, Wang J., Liu C., Song X., Xu X., Li Zhenhong (2018) Predicting grain protein content in winter wheat using hyperspectral and meteorological factor. In Proceedings of the 2018 7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics), Hangzhou, China, 6 August 2018:1-4
- Macnack N., Khim B. C., Mullock J., Raun W. (2014) In-season prediction of nitrogen use efficiency and grain protein in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 45:2480-2494
- Matsunaka T., Watanabe Y., Miyawaki T., Ichikawa N. (1997) Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43:127-134
- Moges S. M., Raun W. R., Mullen R. W., Freeman K. W., Johnson G. V., Solie J. B. (2004) Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. *J. Plant Nutr.* 27:1431-1441
- 日本土壌協会 (2001) 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質および植物体分析法.
- 農業研究センター (1986) 醸造用二条大麦調査基準.
- 農林水産省 (1990~2019) 麦類(子実用)の収穫量(全国農業地域別・都道府県別).
- 大関美香・五月女敏範・加藤常夫・渡邊浩久・桑川晃伸・長嶺敬・春山直人・関和孝博・山口昌宏・鈴木恵美子・大野かおり・沖山毅・高山敏之・渡邊修孝・谷口義則・大塚勝・小田俊介・常見讓史・飯田貴子・鈴木康夫・薄井雅夫 (2013) ビール大麦(二条大麦)「アスカゴールド」の育成. 栃木農試研報71:1-25
- Oozeki M., Sotome T., Haruyama N., Yamaguchi M., Watanabe H., Okiyama T., Kato T., Takayama T., Oyama M., Nagamine T., Suzuki Y., Toyoshima T., Sekiwa T., Oono K., Saito T., Usui M., Arai S., Kumekawa T., Suzuki E., Shirama K., Kihara M., Hoki T., Matsubara H., Ohsawa R. (2017) The two-row malting barley cultivar 'New Sachiho Golden' with null lipoxigenase-1 improves flavor stability in beer and was developed by marker-assisted selection. *Breed. Sci.* 67:165-171
- 大山亮・山口昌宏・大関美香・関和孝博・豊島貴子・鈴木康夫・白間香里・新井申・五月女敏範・加藤常夫 (2017) ビール大麦「ニューサチホゴールド」の高品質安定多収栽培法. 栃木農試研報75:13-19
- Pettersson C. G., Eckersten H. (2007) Prediction of grain protein in spring malting barley grown in northern Europe. *Eur. J. Agron.* 27:205-214
- Raun W. R., Johnson G. V. (1999) Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357-363
- Raun W. R., Solie J. B., Johnson G. V., Stone M. L., Lukina E. V., Thomason W. E., Schepers J. S. (2001) In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93:131-138
- Raun W. R., Solie J. B., Johnson G. V., Stone M. L., Mullen R. W., Freeman K. W., Thomason W. E., Lukina E. V. (2002) Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94:815-820
- Shah S. H., Houborg R., McCabe M. F. (2017) Response of chlorophyll, carotenoid and SPAD-502 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) *Agronomy* 7:61 Doi:10.3390/agronomy7030061
- Shanahan J. F., Schepers J. S., Francis D.D., Varvel G. E., Wilhelm W. W., Tringe J. M., Schlemmer M. R., Major D. J. (2001) Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron. J.* 93:583-589
- Sharma L. K., Franzen D.W. (2014) Use of corn height to improve the relationship between active optical sensor readings and yield estimates. *Precision Agric.* 15:331-345
- Sharma L. K., Bail S. K., Dwyer J. D., Plant A. B., Bhowmik A. (2017) A case study of improving yield prediction and sulfur deficiency detection using optical sensors and relationship of historical potato yield with weather data

- in Maine. *Sensors* 17:1095 Doi:10.3390/s17051095
- Sharma L. K., Bail S. K. (2018) A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability* 10:51 Doi:10.3390/su10010051
- Shibayama M., Sakamoto T., Takada E., Inoue A., Morita K., Yamaguchi T., Takahashi W., Kimura A. (2012) Estimating rice leaf greenness (SPAD) using fixed-point continuous observations of visible red and near infrared narrow-band digital images. *Plant Prod. Sci.* 15:293-309
- 五月女敏範・佐藤圭一・河田尚之・早乙女和彦・福田暎 (1999) 「タカホゴールド」, 「ミカモゴールド」の施肥量及び播種量による農業特性及び醸造品質の変動. 栃木農試研報48:39-46
- 五月女敏範・河田尚之・加藤常夫・関和孝博・西川尚志・夏秋知英・木村晃司・前岡庸介・長嶺敬・小林俊一・和田義春・吉田智彦 (2010a) 栃木県におけるオオムギ縞萎縮ウイルス発生状況と新たに見出されたオオムギ縞萎縮ウイルス系統. 日作紀79:29-36
- 五月女敏範・藤田正好・郡司陽・小川雄大・白石淳夫・小林俊一・高橋行継・吉田智彦 (2010b) 栃木県那須地方におけるビールオオムギ生産の問題点と技術的改善方向. 日作紀79:528-535
- Süß A., Danner M., Obster C., Locher M., Hank T., Richter K. (2015) Measuring leaf chlorophyll content with the Konica Minolta SPAD-502Plus. - Theory, Measurement, Problems, Interpretation. *EnMAP Field Guides Technical Report, GFZ Data Services.* <http://doi.org/10.2312/enmap.2015.010>
- Tan C., Zhou X., Zhang P., Wang Z., Wang D., Guo W., Yun F. (2020) Predicting grain protein content of field-grown winter wheat with satellite images and partial least square algorithm. *PLoS One* 15 Doi : 10.1371/journal.pone.0228500
- 谷口義則・小田俊介・常見讓史・大塚勝・関和孝博・糸川晃伸・山口昌宏・五月女敏範・福田暎・早乙女和彦・河田尚之・石川直幸・加藤常夫・加島典子・宮川三郎・神永明・小玉雅晴・佐々木昭博・仲田聡・徳江紀子・桐生光広・野沢清一・佐藤圭一・伊藤浩 (2001) 二条大麦新品種「スカイゴールド」の育成 (二条大麦農林20号). 栃木農試研報50:1-18
- 栃木県 (2018) 平成31(2019)年産麦類生産振興方針及び麦の栽培技術指針.
- 栃木県農業環境指導センター (2016~2019) 植物防疫年報. 麦類縞萎縮病発生状況.
- 栃木県農業試験場 (2016) 栃木県農業試験場120年史: 32-50
- 塚原俊明・沖山毅・仲田聡・大山亮・石原島由依・関和孝博・加藤常夫 (2020) 食用二条大麦「もち絹香」の窒素施肥方法の最適化. 栃木農試研報81:23-36
- Uddling J., Gelang-Alfredsson J., Piikki K., Pleijel H. (2007) Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynth. Res.* 91:37-46
- 氏原和人・藤井敏男・野沢清一・関口忠男・千葉恒夫 (1984) 大麦縞萎縮病とビールムギ品質. 育雑42(別1):302-303
- Walsh O. S., Klatt A. R., Solie J. B., Godsey C. B., Raun W. R. (2013) Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agric.* 14:343-356
- 渡邊浩久・加藤常夫・糸川晃伸・大野かおり・山口恵美子・大関美香・春山直人・関和孝博・長嶺敬 (2007) ビール大麦「サチホゴールド」の高品質安定多収栽培法. 栃木農試研報59:37-43
- Xue L., Li G., Qin X., Yang L., Zhang H. (2014) Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in south China. *Precision Agric.* 15:95-110
- 山口恵美子・糸川晃伸・谷口義則・山口昌宏・渡辺修孝・関和孝博・加藤常夫 (2004) ビール大麦「スカイゴールド」の高品質安定栽培法. 栃木農試研報53:35-41
- 山口昌宏・谷口義則・関和孝博・大塚勝・五月女敏範・小田俊介 (2002) オオムギ縞萎縮病がビール大麦の収量および麦芽品質に及ぼす影響. 栃木農試研報51:1-8
- 吉田美夫 (1977) 水田におけるムギの湿害の理論と実際 (1). 農業技術32:492-496
- Zhang K., Ge X., Shen P., Li W., Liu X., Cao Q., Zhu Y., Cao W., Tian Y. (2019) Predicting rice grain yield based on dynamic changes in vegetation indexes during early to mid-growth stages. *Remote Sens.* 11 : 387 Doi : 10.3390/rs11040387
- Zhou X., Kono Y., Win A., Matsui T., Tanaka T. S. T. (2020) Predicting within-field variability in grain yield and protein content of winter wheat using UAV-based multispectral imagery and machine learning approaches. *Plant Prod. Sci.* published online 13 September

