

穂肥重点施肥による西南暖地向けパン用  
コムギの高品質多収栽培技術に関する研究

(Studies on the cultivating method to achieve high yield and  
quality in wheat cultivars for bread by intensive nitrogen  
fertilization during stem elongation)

水田 圭祐

(Keisuke Mizuta)

2021



## 目次

第1章	緒言	1
第2章	パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における穂肥重点施肥の効果	
	緒言	8
	材料と方法	9
	結果	11
	考察	14
	摘要	18
	図・表	19
第3章	パン用コムギ品種「せときらら」における穂肥重点施肥の効果	
	緒言	25
	材料と方法	26
	結果	30
	考察	34
	摘要	38
	図・表	39

第4章 茎立ち期の光競合がコムギの倒伏程度および倒伏に関係する形質に  
およぼす影響

緒言----- 47

材料と方法----- 48

結果----- 51

考察----- 54

摘要----- 57

図・表----- 58

第5章 肥効調節型肥料を用いた省力型穂肥重点施肥の検討

緒言----- 65

材料と方法----- 66

結果----- 70

考察----- 75

摘要----- 79

図・表----- 80

## 第6章 茎数を指標とした「せときらら」の生育診断と可変施肥法の検討

緒言	89
材料と方法	90
結果	92
考察	96
摘要	99
図・表	100

## 第7章 総合考察

図・表	118
要旨	122
Summary	125
謝辞	130
引用文献	131
学会誌公表論文のリスト	139

## 第1章 緒言

コムギは、世界の広い範囲で栽培されている作物であり、日本でも年間 855,573 t も生産されている（2008 年から 2018 年の平均値，FAOSTAT 2020）．しかし、日本におけるコムギの食料自給率はカロリーベースで 17%と低く（農林水産省 2020a），その中でもパン用コムギは 3%ととくに低い（農林水産省 2012）．農林水産省の基本計画では、国産コムギの生産量を 2020 年までに 180 万 t まで増加させることを目標としているが（農林水産省 2012），2018 年産コムギの国内総生産量は約 77 万 t と目標を下回っている（農林水産省 2020b）．また、パン用コムギは生産量がいまだ少なく、約 13 万 t にとどまっている（農林水産省 2019）．品質面でも、国産パン用品種の小麦粉で作ったパンは、製パン評価点が外麦製のものと比べて低く（藤田ら 2009，高田ら 2017），需要拡大には生産量の確保だけでなく品質の高位安定化も重要な課題となっている．

パン・中華麺用コムギは、2003 年に「ニシノカオリ」が品種登録されて以降、九州・山口地域においても生産量が増えているが、反収が低いことが課題となっている．九州・山口地域における主要なパン用コムギ品種（くまきらり，さちかおり，せときらら，ちくし W2 号，長崎 W2 号，ニシノカオリ，ミナミノカオリ）の総検査数量は、2009 年では 12,182 t であったが、2019 年では 29,208 t まで

増加している（農林水産省 2020c）．一方で、九州・山口地域における 2019 年産コムギの 10 a あたり収量は、426 kg 10 a<sup>-1</sup>と全国平均の 484 kg 10 a<sup>-1</sup>に比べて低いため（農林水産省 2020b）、生産量を増やすためには収量をこれまで以上に高めなければならない．

安定的に多収を達成するためには、コムギに窒素を効率よく吸収させる必要がある．コムギの収量は、成熟期の地上部窒素蓄積量と強い正の相関があるため（Hitz ら 2017）、収量が高いドイツやイギリスでは農業コンサルタントの指導に基づき、窒素の吸収効率が低い基肥（石丸ら 2016）は施用せず、吸収効率が高い追肥のみで栽培する「生育後期重点型」の施肥体系が一般的となっている（関根・梅本 2015, AHDB 2009）．一方、日本の西南暖地におけるコムギ栽培では、茎数を増やすために基肥や分けつ肥を施用する（和田 2002）「生育前期重点型」の施肥体系が一般的となっている．これは、追肥中心の施肥体系では倒伏や遅れ穂による収量および作業性の低下が予見されるためや（江口ら 1969, 倉井ら 1998）、茎数を増やすことによって収量との関係が強い穂数（稲村ら 2007）を確保しやすくするためとされている．また、西南暖地のコムギのほとんどが排水不良となりやすい水田転換畑で栽培されており、過湿土壌によって分けつの発生が抑制され、茎数が不足すること（小柳 2008, Robertson ら 2009）を回避するねらいもある．そのため、これまで西南暖地のコムギ栽培では生育後期重点

型の窒素施肥が行われてこなかった。

生育後期重点施肥は、日本のコムギ栽培でも収量を高めるために有効である可能性がある。浦野・保科（2012）は、日本めん用品種「キヌヒメ」を対象に基肥に速効性の窒素肥料を施用せず、窒素肥料として被覆尿素のみを全量基肥に施用し、茎立ち期中に窒素を効かせることによって収量が慣行分施以上となることを報告している。また、渡邊ら（2016）は、日本めん用品種「さとのそら」を用い、基肥を抑えて分けつ肥や茎立ち期の窒素施肥量を増やすことによって、乳熟期以降の乾物生産が増加し、収量が 15～50%増加することを報告している。日本におけるコムギの生育後期重点施肥についての研究報告は少なく、前述の研究はいずれも日本めん用品種を対象にした研究であり、パン用コムギを対象にした検証はこれまでなされていない。

パン用コムギの栽培では、収量だけでなく子実タンパク質含有率も重要となる。パン用コムギでは、品質の評価項目として子実タンパク質含有率、灰分、容積重およびフォーリングナンバーの 4 項目が設けられている。このランク区分において、パン用コムギでは子実タンパク質含有率 11.5～14.0%が基準値として設定されている。コムギの子実タンパク質は、約 80%がグルテニンとグリアジンから構成されており、これらが結合することによってグルテンタンパクを形成する（遠藤 1985）。子実タンパク質含有率が 12%を下回ってしまうとグル



テンタンパクの濃度も低下し、パン比容積（膨らみの指標）が低下してしまう（佐藤ら 1999）。そのため、実需者からは高子実タンパク質含有率のパン用コムギが求められているが、コムギの子実タンパク質含有率は、収量が増加するにしたがって低下しやすくなるというトレードオフの関係があるため（江口ら 1969, 岩渕ら 2011）、パン用コムギの栽培では収量を高めつつ子実タンパク質含有率を低下させない栽培方法が必要となる。

生育後期重点施肥は、子実タンパク質含有率を高めるためにも有効である可能性がある。子実タンパク質含有率は、開花期前後の窒素追肥で高まるが（岩渕ら 2007, 島崎ら 2014）、成熟期における子実の窒素含有量は開花期の地上部窒素蓄積量と正の相関関係があることも報告されている（Hitz ら 2017）。開花期の地上部窒素蓄積量は、茎立ち期中に多くの窒素を吸収することによって高まるため（Meng ら 2013）、茎立ち期以降に窒素を多く施用すると子実タンパク質含有率も高められる可能性がある。

生育後期重点施肥には、多くの利点が指摘される一方で、茎立ち期に窒素を多く追肥することによって生じる問題も指摘されている。茎立ち期中の窒素追肥は収量を高めるが、稈長が伸びることによって倒伏しやすくなることが知られている（倉井ら 1998, 土谷 2012）。倒伏は、発生すると最大で 35% も収量を低下させてしまうため（Fischer and Stapper 1987）、これまでの西南暖地のコ

ムギ栽培では茎数を増やすために有効な基肥や分けつ肥（和田 2002）を多く施用し、茎立ち期の窒素追肥量を減らすことによって倒伏を避けつつ収量を確保してきた。しかし、茎立ち期の窒素追肥が倒伏の危険性を高めるとした報告は、いずれも基肥と分けつ肥に窒素を多く施用する施肥体系を基本としていることから、基肥や分けつ肥の窒素施肥量を極端に抑えた条件では異なる結果となる可能性もある。

生育後期重点施肥の肥効は、肥効調節型肥料を用いることによって省力的に再現できる可能性がある。渡邊ら（2016）は、生育後期重点施肥がコムギの多収栽培に有効であることを報告しているが、速効性肥料である硫酸を用いた施肥体系であり、施肥作業に労力や時間がかかると予想される。作業の省力化には肥効調節型肥料が有効であるが（田中ら 2008）、これまでに行われてきた研究は前期重点施肥の肥効を再現するものであり（土谷ら 2007）、生育後期重点施肥の肥効を再現した報告は少ない。肥効調節型肥料は種類によって溶出の仕組みが異なり、被覆尿素は土壌中の水分量と温度に依存して窒素の溶出速度が変化する（藤澤ら 1998, Guertal 2009, 松谷・猪野 2017）。イソブチルアルデヒド縮合尿素（IB）は加水分解によって窒素が無機化され、アセトアルデヒド縮合尿素（CDU）は微生物分解によって窒素が無機化される。また、いずれの肥料も土壌水分や温度による溶出速度の変化も報告されており（尾和・三井 1974）、

肥効調節型肥料を生育前期に施用すると気温や降水量といった気象の影響を受け、肥効が安定しない可能性もある。

本研究では、パン用コムギの多収と高子実タンパク質含有率の両立を目的とし、窒素肥料の吸収効率が低い基肥と分けつ肥（石丸ら 2016）を省略し、その分茎立ち期以降の窒素追肥（穂肥）を分施・増肥した穂肥重点施肥の効果を検証した。また、穂肥重点施肥で懸念される問題の確認とその解決にも取り組んだ。第 2 章では、九州地方の広い範囲で栽培されているパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における穂肥重点施肥の効果を検証した。第 3 章では、穂肥重点施肥の効果を山口県の奨励品種である多収パン用コムギ品種「せときらら」でも検証した。第 4 章では、第 2 章と第 3 章で実施した栽培試験の結果から、倒伏を誘導する直接的な原因は茎立ち期に施用する窒素肥料でなく、茎立ち期における群落内の光競合であると考え、この仮説を検証した。第 5 章では、肥効調節型肥料を用いて省力的に第 2 章から第 4 章で明らかにした穂肥重点施肥の効果を再現できるか検証した。第 6 章では、苗立ち不良となった場合、分けつ肥を施用することによって茎数不足による収量の低下を軽減できるか検証した。第 7 章の総合考察では、第 2 章から第 6 章の研究結果を総括的に考察するとともに、本研究で得た知見をもとにさらなる多収栽培方法や省力・安定栽培方法についても考察した。また、5 作期の栽培試験での結果やそこで得た知見から、穂肥重点

施肥で栽培する際のポイントを総括し，栽培暦を作成した．



## 第2章 パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における穂肥重点施肥の効果

### 緒言

パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」は熊本県、大分県、福岡県、長崎県の奨励品種となっており、九州地方におけるパン用コムギ生産の最も重要な品種となっている。「ミナミノカオリ」は稈長と穂長が短いため耐倒伏性が強く、パンの比容積（ふくらみ）や官能試験の評定が良く、製パン適正が優れるものの、穂数がやや少ないため収量もやや低いという特徴がある（藤田ら 2009）。熊本県の場合、「ミナミノカオリ」を含むコムギの収量は、平成19年から平成26年の平均収量が  $317 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  と普通小麦の全国平均収量の  $376 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  に比べて低く、同県の多収地域である大津町に限っても  $382 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  にとどまる（農林水産省作物統計の作況調査「市町村別データ」からの計算値）。

子実タンパク質含有率を低下させずに収量を高めるためには、生育後半に窒素肥料を多量に追肥する生育後期重点施肥が有効であることが報告されている（渡邊ら 2016）。一方、コムギでは窒素追肥が収量と子実タンパク質含有率におよぼす影響は品種によって異なるため（Büchi ら 2016）、生育後期重点施肥の効果はパン用コムギ品種の「ミナミノカオリ」と日本めん用の多収品種である「さとのそら」の場合（渡邊ら 2016）では異なる可能性がある。

本研究では、パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」の多収地域である熊本県菊池郡大津町において、穂肥重点施肥が「ミナミノカオリ」の収量水準を高められるかどうか、増収により予見される子実タンパク質含有率の低下が生じるかどうかを検証した。生育後期重点施肥では、収量は穂数が増加することによって高まったことが報告されている（渡邊ら 2016）ことから、主茎や分げつの成長量や有効化率を発生節位別に解析した。また、穂肥窒素を増肥することで予見さ

れる倒伏や遅れ穂の発生についても解析した。

## 材料と方法

試験は、2014/15 年と 2015/16 年の 2 作期にわたり、熊本県菊池郡大津町（北緯 32 度 51 分，東経 130 度 52 分）の農家圃場で栽培されたパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」を対象に行った。圃場は、いずれの年次も夏作としてダイズを栽培したあと地であった。土壌は、黒ボク土に分類され、理化学性は第 2-1 表に示した。理化学性分析に供試した土壌サンプルは、2014 年 12 月 8 日に基肥を施用する前に地表下 10 cm 深の作土を移植ごてで採取した。

播種は、2014/15 年では 12 月 8 日，2015/16 年では 12 月 1 日に行った。播種量は、両作期とも全ての処理区で約  $7 \text{ g m}^{-2}$  とした。条間は 30 cm とし，6 条ドリル播きのトラクタで作業を行った。

処理区は、2014/15 年では慣行分施肥区，慣行基肥 2 倍区，穂肥重点施肥区，穂肥重点 2 倍区を設けた。2015/16 年では慣行分施肥区，穂肥重点施肥区，穂肥重点多肥区を設けた。処理区の配置は、2014/15 年では 3 反復の分割区法，2015/16 年では 4 反復の分割区法とした。各処理区の窒素施肥量と施肥時期は，第 2-2 表に示した。2014/15 年の窒素施肥は，分けつ肥を GS14（4 葉目抽出期，2 月 6 日），穂肥Ⅰを GS30（茎立ち開始期，2 月 26 日），穂肥を GS32（第 2 伸長節間伸長期，3 月 16 日），穂肥Ⅱを GS47（止葉抽出期，4 月 1 日）に尿素で行った（第 2-2 表）。GS は，Zadoks ら（1974）の生育ステージを示す。リンとカリは，苦土重焼燐（ $\text{P}_2\text{O}_5$  : 35%）と塩化カリ（ $\text{K}_2\text{O}$  : 60%）を用い，播種直前にリン成分とカリ成分でそれぞれ  $3.6 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。

2015/16 年における窒素の施肥時期は，分けつ肥を GS14（1 月 21 日），穂肥Ⅰを GS30（2 月 25 日），穂肥を GS32（3 月 8 日），穂肥Ⅱを GS47（4 月 1 日）と

した（第 2-2 表）．リンとカリは、前述の苦土重焼燐と塩化カリをそれぞれ  $8.0 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した．

調査は、2014/15 年では穂揃い期（2015 年 4 月 15 日）と乳熟期（2015 年 5 月 11 日）および成熟期（2015 年 5 月 31 日）に行い、2015/16 年では止葉抽出期（2016 年 4 月 2 日）、穂揃い期（2016 年 4 月 17 日）、乳熟期（2016 年 5 月 17 日）および成熟期（2016 年 5 月 30 日）に行った．調査内容は、茎の節位別発生率と発生節位別乾物重とした．また、穂揃い期では地上部窒素蓄積量、成熟期では収量、収量構成要素、草丈および倒伏程度も調査した．

調査のうち、発生節位別にみた有効化した茎の発生率と分けつあたりの器官別乾物重の調査については、各プロットから 10 株程度を無作為に抜き取って供試した．茎の発生率は、まず分けつを主茎から節位ごとに取り分け、発生していた分けつの本数を主茎の本数で除して求めた．発生していた分けつのうち、有効化していた分けつは穂に粒が 1 粒以上稔実しているものとし、茎の有効化率を求めた．有効化した茎の発生率は、茎の発生率と茎の有効化率をかけて求めた．分けつあたりの器官別乾物重は、茎の発生率を調査したサンプルをさらに器官別（穂、稈、止葉、下位葉）に分解し、 $70^{\circ}\text{C}$  で 48 時間以上乾燥させた後測定した．穂揃い期の地上部窒素蓄積量は、 $0.67 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  の範囲を地際から刈り取り、器官別に分解して乾物重とケルダール法（大山 1990）およびインドフェノール法（大山 1990）で求めた窒素含有率を乗じて求めた．成熟期の地上部窒素蓄積量は、窒素含有量を求めた茎（各プロット約 50 本）あたりの窒素含有量に穂数を乗じて求めた．

収量調査の試料は、3 条を条に沿って 1 m 地際から刈り取り、ガラス温室内で風乾させた後、脱穀、唐箕選を行った．収量は、唐箕選した子実を 2014/15 年では篩わないまま、2015/16 年では篩目  $2.2 \text{ mm}$  で篩った後、計量して求めた．



全乾物重は収量調査用サンプルで求めた風乾重から水分含有量を差し引いて求めた。穂数もこのサンプルで計算した。千粒重は、収量を調査した子実から無作為に 1000 粒を抽出して計量した。収穫指数は、収量（水分を除く）を全乾物重で除して求めた。一穂粒数は、収量調査用サンプルから無作為に抽出した 20 穂を分解し、その粒数を数えて求めた。子実タンパク質含有率は、子実の窒素含有率に 5.83 を乗じて求めた。収穫期の草丈は、茎を各処理区から無作為に 20 本選び、地際から穂の先端（芒を除く）までの長さを測定した。倒伏程度は、作物調査基準の成長解析法（広田 2013）に従い、0（無）～5（甚）で評価した。

統計処理は、いずれの作期分散分析した後、有意差があったものは Tukey の多重比較で検定した。

## 結果

第 2-3 表には、2014/15 年および 2015/16 年の二作期に慣行分施と穂肥重点施肥で栽培した「ミナミノカオリ」の収量、収量構成要素、子実タンパク質含有率（GPC）および成熟期の草丈を示した。収穫は、遠隔地での試験ということもあり、いずれの年次でも慣行分施区に合わせて行ったが、穂肥重点施肥区の成熟日は茎葉の緑度や粒の硬さからみて、慣行分施区に比べて 2014/15 年では 4 日、2015/16 年では 2 日程度遅れていた。

2014/15 年の収量は、穂肥重点施肥区で  $567 \text{ g m}^{-2}$  と慣行分施区の  $492 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に高かった。2015/16 年の収量は、慣行分施区で  $582 \text{ g m}^{-2}$ 、穂肥重点施肥区で  $607 \text{ g m}^{-2}$  と同程度であった。窒素を増肥した処理区では、いずれの作期も収量が高まらなかった。

全乾物重は、2014/15 年では穂肥重点施肥区が慣行分施区より 13% 重くなる傾向があった。2015/16 年ではいずれの処理区も約  $1300 \text{ g m}^{-2}$  であった。収穫指

数は、いずれの作期も処理による有意な差はなかった。

2014/15 年の穂数は、穂肥重点施肥区で 605 本  $\text{m}^{-2}$  と慣行分施肥区の 507 本  $\text{m}^{-2}$  に比べて有意に多かった。2015/16 年は、いずれの処理区も同程度であった。一穂粒数と千粒重は、いずれの年次も穂肥重点施肥区と慣行分施肥区との間に有意な差はなかった。

2014/15 年の GPC は、いずれの処理区も約 9% であった。2015/16 年は、穂肥重点施肥区で 13.8% と、慣行分施肥区の 12.5% に比べて有意に高かった。穂肥重点多肥区の子実タンパク質含有率も 13.8% と慣行分施肥区より有意に高かった。

成熟期の草丈は、2014/15 年の穂肥重点施肥区と穂肥重点 2 倍区では、それぞれ 88.7 cm および 88.1 cm と、慣行分施肥区や慣行基肥 2 倍区に比べて 2.2～3.1 cm 有意に低かった。2015/16 年では、いずれも約 93 cm であった。いずれの作期も倒伏は発生しておらず、倒伏程度はすべての処理区で 0（無）であった（データ省略）。

第 2-4 表に 2015/16 年に栽培した「ミナミノカオリ」における発生節位別にみた有効化した茎の発生率を示す。括弧内の数値は成熟期に発生していた茎の発生率を示す。例えば、慣行分施肥区の主茎第 2 節の 76.6（78.7）は、成熟期に主茎第 2 節から発生していた分げつの発生率が 78.7% で、それに茎の有効化率をかけて、主茎第 2 節から発生していた有効分げつの発生率が 76.6% であったことを示す。

有効化した茎の発生率は、主茎では慣行分施肥区が 95.7% と一部無効化していたが、穂肥重点施肥区ではすべての茎が有効化していた。主茎第 1 節分げつでは、いずれの処理区でも有効化した茎の発生率が約 97% であった。主茎第 2 節分げつでも、慣行分施肥区と穂肥重点施肥区は約 77% と同程度であった。穂肥重点多肥区では、89.2% と慣行分施肥区に比べて有意に高かった。主茎第 3 節分げ

つの有効化した茎の発生率は、穂肥重点施肥区が 62.2%と慣行分施肥区の 19.1%に比べて有意に高かった。これは、穂肥重点施肥区では茎の発生率が 64.9%と、慣行分施肥区の 21.3%に比べて高いためであった。穂肥重点多肥区の主茎第 3 節における有効化した茎の発生率も、48.6%と慣行分施肥区に比べて有意に高かった。鞘葉節分けつの有効化した茎の発生率は、いずれの処理区でも約 40%であった。分けつを発生節位ごとに分類した結果、主茎第 4 節以上の節位から発生した 1 次分けつや 1 次分けつから発生した 2 次分けつはほとんどなかった。

第 2-1 図に 2015/16 年に栽培した「ミナミノカオリ」における主茎、主茎第 2 節分けつおよび主茎第 3 節分けつの器官別乾物重を示した。主茎全体の乾物重は、止葉抽出期、乳熟期および成熟期のいずれも同程度で、それぞれ約 1.1 g、約 2.9 g および約 2.9 g であった。主茎第 2 節分けつ全体の乾物重は、止葉抽出期では慣行分施肥区が穂肥重点施肥区に比べて有意に重かった。止葉抽出期から乳熟期にかけては、穂肥重点施肥区では各器官の乾物増加量が慣行分施肥区に比べて 9~17%多く、茎全体の乾物増加量が 1.66 g と慣行分施肥区の 1.48 g に比べて多かった。その結果、乳熟期における茎全体の乾物重は、穂肥重点施肥区では慣行分施肥区に比べて 0.21 g 重い傾向があった。乳熟期から成熟期にかけての増加量も慣行分施肥区で 0.15 g であったのに対し、穂肥重点施肥区では 0.27 g と多く、成熟期における茎全体の乾物重は穂肥重点施肥区が慣行分施肥区に比べて有意に重かった。主茎第 3 節分けつ全体の乾物重は、止葉抽出期では分けつが葉腋から抽出していなかったため、測定しなかった。乳熟期における茎全体の乾物重は、慣行分施肥区が 2.03 g と穂肥重点施肥区の 1.61 g に比べて重い傾向があった。乳熟期から成熟期にかけて慣行分施肥区の乾物重は 0.36 g 減少したのに対し、穂肥重点施肥区は 0.67 g 増加した。その結果、成熟期における茎全体の乾物重は、慣行分施肥区で 1.67 g、穂肥重点施肥区で 2.28 g と穂肥重点施肥区

が慣行分施肥区に比べて有意に重かった。

第 2-2 図に 2015/16 年作期に栽培した「ミナミノカオリ」における穂揃い期および成熟期の地上部窒素蓄積量を示した。穂揃い期における地上部窒素蓄積量は、穂肥重点施肥区で  $13.5 \text{ g m}^{-2}$  と、慣行分施肥区の  $12.0 \text{ g m}^{-2}$  に比べて多い傾向があった。慣行分施肥区では、穂揃い期から成熟期にかけて  $3.6 \text{ g m}^{-2}$  増加したのに対し、穂肥重点施肥区では  $5.3 \text{ g m}^{-2}$  も増加した。成熟期では、穂の窒素蓄積量と茎葉の窒素蓄積量のいずれも穂肥重点施肥区で有意に多く、地上部全体の窒素蓄積量が慣行分施肥区で  $15.6 \text{ g m}^{-2}$ 、穂肥重点施肥区で  $18.8 \text{ g m}^{-2}$  であった。穂肥重点多肥区は、穂揃い期では地上部全体の窒素蓄積量が  $16.6 \text{ g m}^{-2}$  と慣行分施肥区や穂肥重点施肥区に比べて多い傾向があった。穂揃い期から成熟期にかけて吸収した窒素量は  $1.8 \text{ g m}^{-2}$  と慣行分施肥区や穂肥重点施肥区に比べて少なく、成熟期の窒素蓄積量は穂肥重点施肥区と同程度であった。

## 考察

本章では、2014/15 年および 2015/16 年に熊本県のコムギ多収地域において、従来の施肥方法で重視される基肥と分けつ肥の窒素施肥を行わず、その分穂肥を増肥する穂肥重点施肥の効果を検証した。

穂肥重点施肥は、コムギの収量を高めるために有効な栽培方法であると考えられた。穂肥重点施肥区は、慣行分施肥区に比べて穂数が増加することによって収量が高まった（第 2-3 表）。コムギの収量は穂数と比例するため（稲村ら 2007）、これまでの施肥法では分けつの発生を促す基肥と分けつ肥（和田 2002）が重要視されてきた。しかし、穂肥重点施肥区は基肥と分けつ肥を施肥していないにもかかわらず、主茎第 3 節分けつにおける有効化した茎の発生率が慣行分施肥区に比べて有意に高かった（第 2-4 表）。穂肥重点施肥は、発生した分けつの中で

もとくに主茎第 3 節分げつのような主茎高位節から発生した茎の無効化を防ぐ効果があり、穂数を従来の分施体系よりも多くすることが可能であることが明らかとなった。

穂肥重点施肥は、パン用コムギの高品質栽培にも有効であると考えられた。コムギの子実タンパク質含有率は収量の増加に伴って低下するが（江口ら 1969, 岩渕ら 2011）、穂肥重点施肥区では、収量が慣行分施区と同水準の場合（2015/16 年）には子実タンパク質含有率が高く、収量が高くなった場合（2014/15 年）でも子実タンパク質含有率が低下しなかった（第 2-3 表）。子実タンパク質含有率を高めるには、穂揃い期から開花期にかけての窒素施肥（Rawluk ら 2000, 高山ら 2004, 岩渕ら 2007, 島崎ら 2014, 石丸ら 2015）や、開花後における根に蓄積した窒素の再転流（Andersson ら 2005）、地力に由来する窒素の吸収（石丸ら 2016）が重要であることが報告されている。穂肥重点施肥区は、慣行分施区に比べて穂揃い期から成熟期にかけて吸収した窒素の量が  $1.7 \text{ g m}^{-2}$  多かったことから（第 2-2 図）、慣行の分施体系に比べて穂揃い期以降の窒素吸収量を増やし、多収化しても子実タンパク質含有率を高い水準に維持できると考えられた。一方、穂肥重点施肥区は穂揃い期から成熟期にかけて茎葉から穂に転流した窒素量が慣行分施区に比べて  $0.8 \text{ g m}^{-2}$  多かったものの、茎葉に残った窒素量も多かった（第 2-2 図）。栽培を行った試験圃が遠地であることから、いずれの作期でも穂肥重点施肥区は慣行分施区の成熟期に合わせて収穫したため、やや早刈りすることとなった。収穫を適期に行えば、茎葉から穂への窒素再転流量をさらに増加できると考えられた。

穂肥重点施肥は、倒伏の危険性を高めない可能性がある。これまでの研究では、茎立ち期の窒素追肥は稈長を伸ばし、倒伏の危険性を高めるとされているが（江口ら 1969, 倉井ら 1998, 土谷 2012）、穂肥重点施肥区は慣行分施区に比べ

て成熟期の草丈がむしろ短かった（第 2-3 表）．茎立ち期の窒素追肥が倒伏の危険性を高めるとした研究は，いずれも基肥と分けつ肥を多く施用する従来型の施肥体系である（江口ら 1969，倉井ら 1998，土谷 2012）．穂肥重点施肥は，茎立ち期以前に窒素を施肥しないという点でこれらの研究と大きく異なっている．倒伏は，茎立ち期中の窒素追肥量だけでなく，茎立ち期以前の窒素施肥量も関係する可能性が高いため，これらの関係を第 4 章にて詳細に検証した．

穂肥重点施肥は，窒素を茎立ち後にも追肥するが，遅れ穂は増加しなかった．麦類では，茎立ち後に窒素を多く追肥することにより遅れ穂が増加する（倉井ら 1998）．本研究の穂肥重点施肥区では，最も発生時期が遅かった主茎第 3 節分けつが止葉抽出期以降に発生したが，成熟期では主茎第 2 節分けつと同等の乾物重にまで成長した（第 2-1 図）．穂肥重点施肥区の主茎第 3 節分けつの千粒重は 37.7 g と，主茎や他の分けつの 36.6 g と同程度であった（データ省略）．渡邊ら（2016）は，無効分けつの発生は基肥によって促され，有効茎歩合を低下させることを報告している．鎌田ら（2016）は裸麦において，穂肥を増肥すると本来無効化する軽い茎が遅れ穂や比較的重い無効茎になることを明らかにした．このことから，倉井ら（1998）の報告のように穂肥窒素の増肥が遅れ穂を増加させる原因のひとつは，基肥や分けつ肥を施肥したことによって，軽い茎が多く発生するためと考えられた．浦野（2014）が試験したオオムギの後期重点施肥法でも，本研究と同様に（第 2-4 表），基肥と分けつ肥を省略すると無効化する茎がほとんど発生しなかったことから，基肥と分けつ肥を省略した穂肥重点施肥は，軽い茎の発生を抑えることにより遅れ穂の発生を抑えると考えられた．

穂肥重点施肥が収量構成要素におよぼす影響は，品種によって異なると考えられた．一穂粒数は，窒素の施肥も含め，様々な要因で増減することが知られて

いるが（藤吉 1953, 佐藤ら 1993, 福寫ら 2004, 豊田ら 2004, 荻内・作山 2005, 高橋ら 2010, Zheng ら 2014, Guo and Schnurbusch 2015), 倉井ら (1998) は, 茎立ち後の窒素追肥は一穂粒数を増加させ収量を高めたと報告している. 本研究では, 一穂粒数は, 茎立ち後にあたる止葉抽出期に窒素を穂肥重点施肥区で  $5 \text{ g m}^{-2}$ , 穂肥重点 2 倍区で  $10 \text{ g m}^{-2}$  施肥したにもかかわらず, 増加しなかった (第 2-3 表). また, 千粒重も, 穂肥窒素を増肥しても増加しなかった (第 2-3 表). 渡邊ら (2016) は, 日本めん用品種「さとのそら」において, 生育後期重点施肥で栽培することによって登熟後半まで乾物生産が高く, 一穂粒数と千粒重が増加したことを報告している. 渡邊ら (2016) の結果と本研究とではこの点が明らかに異なっていた. パン用品種でも, 成長特性が品種によって異なる可能性があるため, 次章では品種特性が異なる西南暖地向けパン用コムギ品種「せときらら」でも穂肥重点施肥の効果を検証した.

## 摘要

暖地向けパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」は、子実タンパク質含有率が高いものの、収量が低いという特徴がある。本研究では、熊本県のコムギ多収地域において、「ミナミノカオリ」の高品質多収化を目的として、基肥と分けつ肥を省略し、穂肥を増肥した穂肥重点施肥が、収量、収量構成要素、分けつの成長量や消長におよぼす影響を検証した。穂肥重点施肥区は、2014/15年と2015/16年のいずれも慣行分施肥区に比べて穂数が5~20%増加した。その結果、2014/15年では慣行分施肥区に比べて収量が15%増加した。子実タンパク質含有率は、収量が増加したにもかかわらず低下しなかった。2015/16年では、収量は $607 \text{ g m}^{-2}$ と慣行分施肥区と同程度であったが、子実タンパク質含有率は13.8%と慣行分施肥区の12.5%に比べて有意に高くなった。一穂粒数と千粒重はいずれの作期でも穂肥重点施肥では増加しなかった。穂肥重点施肥区で穂数が増加した原因は、主茎第3節分けつの有効化した茎の発生率が62.2%と、慣行分施肥区の19.1%に比べて高いためであった。成熟期における主茎第3節分けつの乾物重は、穂肥重点施肥区で $2.28 \text{ g}$ と慣行分施肥区の $1.67 \text{ g}$ に比べて有意に重かった。地上部窒素蓄積量は、慣行分施肥区では穂揃い期から成熟期にかけて $3.6 \text{ g m}^{-2}$ 増加し、穂肥重点施肥区では $5.3 \text{ g m}^{-2}$ 増加した。その結果、成熟期では、穂肥重点施肥区で $18.8 \text{ g m}^{-2}$ と慣行分施肥区の $15.6 \text{ g m}^{-2}$ に比べて有意に多かった。穂肥重点施肥は、収量が増加しても窒素吸収量を増加させることで子実タンパク質含有率を高水準に維持するため、パン用コムギ「ミナミノカオリ」の高品質多収栽培に有効であると考えられた。



第 2-1 表 2014/15 年の試験圃場における作土の理化学性.

pH (H <sub>2</sub> O)	全窒素 (g kg <sup>-1</sup> 乾土)	可給態リン酸 (g kg <sup>-1</sup> 乾土)	交換性塩基 (g kg <sup>-1</sup> 乾土)		
			K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
5.00	3.26	0.27	0.36	6.02	0.45

測定は、表土から 10 cm 深までの作土を対象に行った.

第 2-2 表 2014/15 年および 2015/16 年における窒素肥料の施肥時期と施肥量

処理区	施肥時期 (g m <sup>-2</sup> )				
	基肥	分げつ肥 (GS14)	穂肥 I (GS30)	穂肥 (GS32)	穂肥 II (GS47)
2014/15 年					
慣行分施肥区	5.5	3.0		2.0	
慣行基肥 2 倍区	11.0	3.0		2.0	
穂肥重点施肥区			5.0		5.0
穂肥重点 2 倍区			5.0		10.0
2015/16 年					
慣行分施肥区	4.0	3.0		3.0	
穂肥重点施肥区			5.0		5.0
穂肥重点多肥区			5.0	9.4	5.0

GS は, Zadoks ら (1974) の生育ステージを示す.

第 2-3 表 2014/15 年および 2015/16 年の二作期に慣行分施と穂肥重点施肥で栽培した「ミナミノカオリ」の収量，収量構成要素，子実タンパク質含有率（GPC）および成熟期草丈．

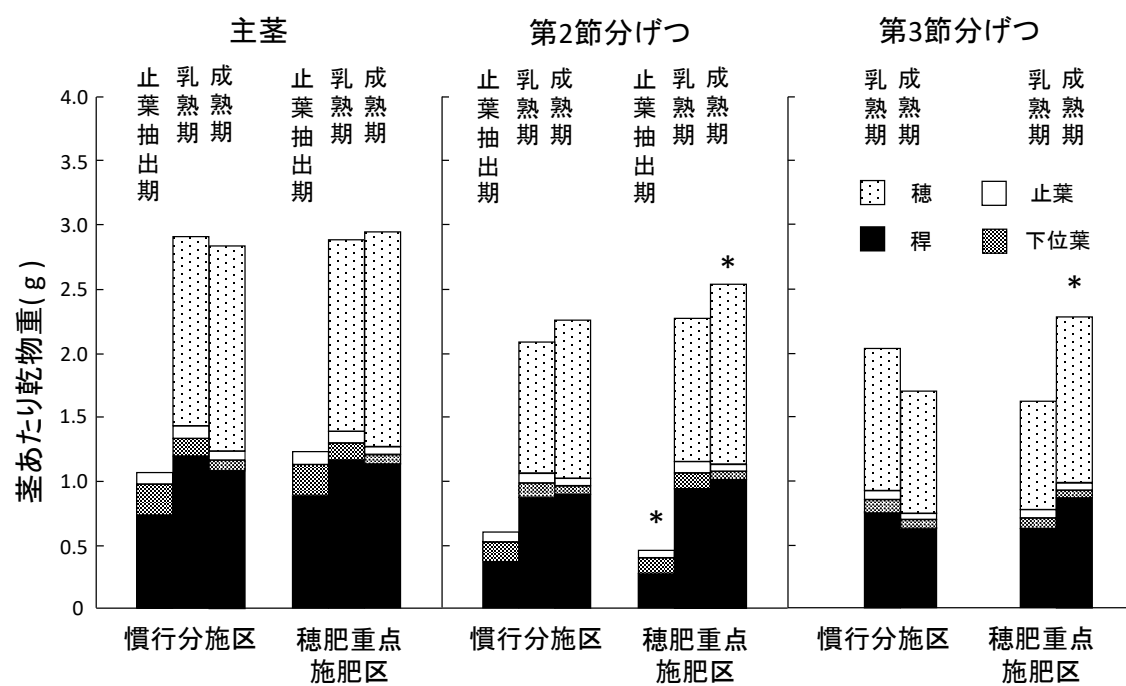
処理区	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾 物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫 指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)	草丈 (cm)
2014/15 年								
慣行分施区	492a	1234	35.8	507a	26.5	37.1	8.9	90.9a
慣行基肥 2 倍区	498ac	1318	33.3	565ab	27.3	37.5	8.6	91.2a
穂肥重点施肥区	567b	1395	35.8	605b	26.8	36.7	9.1	88.7b
穂肥重点 2 倍区	558bc	1363	36.0	638b	29.2	36.3	10.0	88.1b
2015/16 年								
慣行分施区	582	1278	39.9	531	36.7	35.6	12.5a	93.4
穂肥重点施肥区	607	1312	40.5	557	35.3	35.7	13.8b	93.0
穂肥重点多肥区	581	1288	39.4	584	38.1	33.9	13.8b	93.4

収量と千粒重は子実の含水率 12.5%に補正した値を示す．英小文字が付された値は分散分析で有意差があることを示し，異なる英小文字を付された値は，Tukey の多重比較において 5%水準で有意差があることを示す．

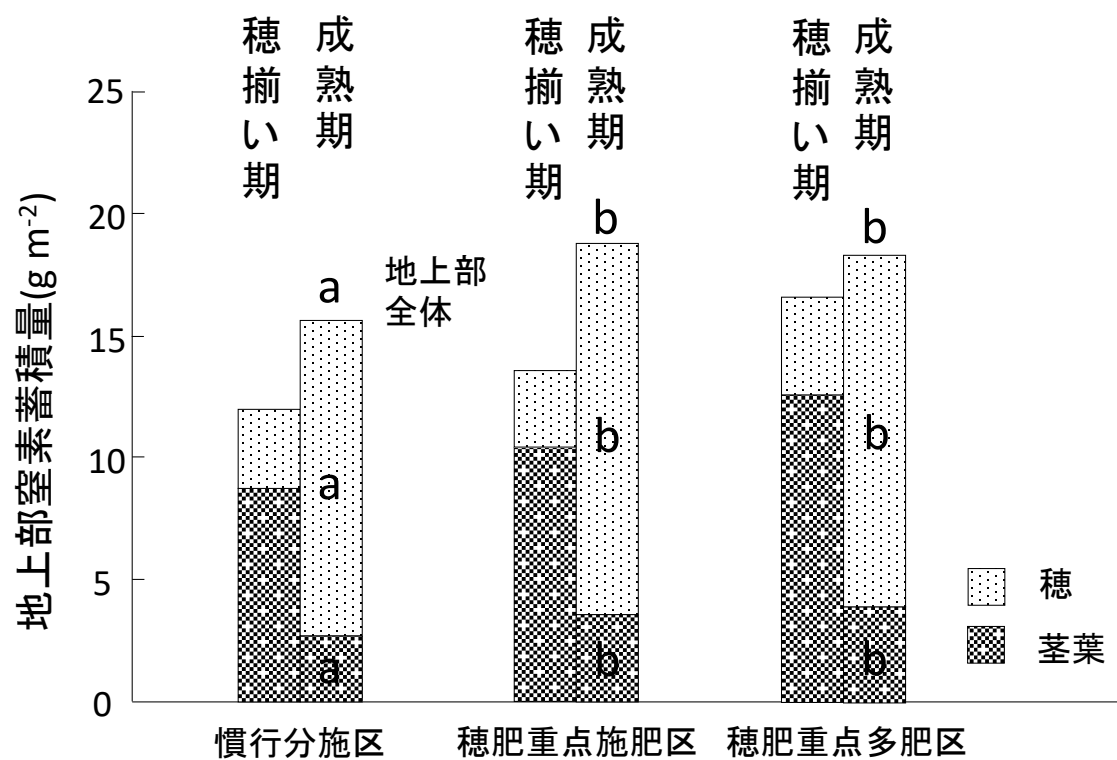
第 2-4 表 2015/16 年作期に栽培した「ミナミノカオリ」における発生節位別にみた有効化した茎の発生率.

処理区	有効化した茎の発生率(%)				
	主茎	主茎第 1 節	主茎第 2 節	主茎第 3 節	鞘葉節
慣行分施肥区	95.7a (100)	95.7 (95.7)	76.6a (78.7)	19.1a (21.3)	42.6 (53.2)
穂肥重点施肥区	100b (100)	97.3 (97.3)	78.4ab (78.4)	62.2b (64.9)	35.1 (35.1)
穂肥重点多肥区	97.3ab (100)	97.3 (97.3)	89.2b (89.2)	48.6c (56.8)	40.5 (40.5)

有効化した茎の発生率＝茎の発生率×茎の有効化率. 括弧内の数値は主茎および分げつの発生率を示す. 異なる英小文字を付された値は, Tukey の多重比較において 5%水準で有意差があることを示す.



第2-1図 2015/16年作期に栽培した「ミナミノカオリ」における主茎、第2節分げつおよび第3節分げつあたりの器官別乾物重。\*は、茎全体の乾物重が同じ生育ステージの慣行分施肥区に対して5%水準で有意差があることを示す。



第 2-2 図 2015/16 年作期に栽培した「ミナミノカオリ」における穂揃期および成熟期の地上部窒素蓄積量. 測定したブロック数は、穂揃期の慣行分施肥区では 2 ブロック、それ以外は 4 ブロックとした. 異なる英小文字は、Tukey の多重比較において 5%水準で有意差があることを示す.



### 第3章 パン用コムギ品種「せときらら」における穂肥重点施肥の効果

#### 緒言

パン用コムギ品種「せときらら」は、2013年に「ニシノカオリ」に替わって山口県の奨励品種となった。「せときらら」は、「ニシノカオリ」に比べて収量が約4割高く、製パン適性が輸入コムギ並みに高い（高田ら 2017）。一方で、多収である「せときらら」は、他の品種と同様に子実タンパク質含有率が低下しやすく（江口ら 1969, 岩渕ら 2011）、パン用コムギのランク区分で定められた基準値の11.5%を下回りやすいという短所もある。製パン性が改良された「せときらら」でも、粉のタンパク質含有率が11%未満になると製パン性が低下するため（高田ら 2017）、栽培では子実タンパク質含有率が低下しないように配慮が必要である。

穂肥重点施肥の効果は、同じ西南暖地向けのパン用コムギ品種でも異なる可能性がある。前章では、パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における基肥と分けつ肥を省略し、穂肥窒素を分施、増肥した穂肥重点施肥の効果を検証した。その結果、穂肥重点施肥は高次節の分けつが有効化し、穂数が増えることによって増収すること、収穫期の地上部窒素蓄積量が多くなり子実タンパク質含有率が高くなることを明らかにした。一方、穂肥重点施肥が「ミナミノカオリ」の一穂粒数と千粒重におよぼす影響は、日本めん用多収品種「さとのそら」における生育後期重点施肥（渡邊ら 2016）と異なった。コムギは、品種によって窒素施肥の効果が異なることが知られている（Noureldin ら 2013, Büchi ら 2016）。前章で供試した「ミナミノカオリ」は、子実タンパク質含有率が高くなりやすく、収量が低い（藤田ら 2009）という特徴があるのに対し、「せときらら」は収量が高く、子実タンパク質含有率が低くなりやすい（高田ら 2017）といった異な



る特徴がある．そのため、「せときらら」における穂肥重点施肥の効果は「ミナミノカオリ」の場合と同様であるか検証する必要がある．

本章では，多収パン用コムギ品種「せときらら」を穂肥重点施肥で栽培した場合，「ミナミノカオリ」の場合と同様に収量と子実タンパク質含有率を高められるかを検証した．さらに，「せときらら」の多収性を生かし，穂肥重点施肥の出穂前総窒素施肥量を増やすことによって収量や子実タンパク質含有率を一層高められるかも検証した．

## 材料と方法

試験は，2014/15 年と 2015/16 年，2016/17 年の 3 作期にわたり，山口大学農学部附属農場（北緯 34 度 15 分，東経 131 度 47 分）で栽培したパン用コムギ品種「せときらら」を対象に行った．圃場はすべての年次で水田用地とし，2014/15 年では夏作に水稻を栽培した後作で栽培した．2015/16 年と 2016/17 年は，2014 年以降に水稻を栽培していない同一の転換畑で栽培した．土壌は灰色低地土に分類され，理化学性は第 3-1 表に示した．理化学性分析に供試した土壌試料は，2014/15 年では 1 月 19 日，2015/16 年では 3 月 20 日にそれぞれ窒素を施肥していない 3 地点から，地表下 10 cm 深までの作土を移植ごてで採取した．

播種は，2014/15 年では 11 月 20 日，2015/16 年では 11 月 12 日，2016/17 年では 11 月 7 日に行った．播種量は，2014/15 年では  $7.2 \text{ g m}^{-2}$ （約 180 粒  $\text{m}^{-2}$ ），2015/16 年では  $7.8 \text{ g m}^{-2}$ （約 190 粒  $\text{m}^{-2}$ ），2016/17 年では  $6.3 \text{ g m}^{-2}$ （約 160 粒  $\text{m}^{-2}$ ）とした．栽培は 1.5 m 幅の畝たて様式とし，畝中央に 4 条ドリル播きとした．条間は 30～35 cm とし，播種作業は 2014/15 年では手作業，2015/16 年と 2016/17 年では 4 条播種機で行った．

2014/15 年の処理区は、3 ブロックを分割区法に従って配置し、主区を窒素施肥時期 2 水準（慣行分施，穂肥重点施肥），副区を出穂前総窒素施肥量 3 水準（6, 10, 14  $\text{g m}^{-2}$ ）とした（第 3-2 表）．慣行分施区では，基肥として出穂前総窒素施肥量の 44%，分けつ肥として 21%（2 月 2 日，GS14），穂肥として 35%（3 月 6 日，GS31，第 1 伸長節間伸長期）を尿素で施肥した．穂肥重点施肥区では基肥と分けつ肥に窒素を施肥せず，GS30（2 月 24 日）に穂肥Ⅰとして出穂前総窒素施肥量の 50%，GS39（3 月 30 日，止葉抽出期）に穂肥Ⅱとして残りの 50%を尿素で施肥した．いずれの処理区でも開花期（2015 年 4 月 27 日，GS65）に窒素成分で 6.3  $\text{g m}^{-2}$ の開花期追肥を行った．リンとカリは，PK 化成 40 号（ $\text{P}_2\text{O}_5$ ：20%， $\text{K}_2\text{O}$ ：20%）を用い，2014 年 11 月 6 日に成分でそれぞれ 10  $\text{g m}^{-2}$ ずつ施用した．窒素，リン，カリ以外の基肥は，苦土入り石灰と微量要素肥料ミネラル G をそれぞれ 100  $\text{g m}^{-2}$ ずつ施用した．

2015/16 年では，慣行分施区と穂肥重点施肥区を比較した試験 1 と，穂肥重点施肥区をベースにより多収となる条件を明らかにした試験 2 を行った．処理区は，試験 1 では 7 ブロックを乱塊法にしがって配置し，試験 2 では 3 ブロックを分割区法に従って配置した．試験 1 の窒素施肥は，慣行分施区と穂肥重点施肥区のいずれも尿素を用い，第 3-2 表に示した通りに行った．窒素の施肥時期は，基肥（11 月 12 日），分けつ肥（1 月 21 日，GS15，5 葉目抽出期），穂肥Ⅰ（2 月 15 日，GS30），穂肥（3 月 1 日，GS31），穂肥Ⅱ（3 月 21 日，GS45，止葉抽出期）とした．開花期追肥は，窒素成分で 6  $\text{g m}^{-2}$ を GS65（2016 年 4 月 13 日）に施肥した．試験 2 では，基肥と分けつ肥で窒素をそれぞれ 6  $\text{g m}^{-2}$ および 3  $\text{g m}^{-2}$ 施肥した 6-3 区，3  $\text{g m}^{-2}$ ずつ施肥した 3-3 区，0  $\text{g m}^{-2}$ および 6  $\text{g m}^{-2}$ 施肥した 0-6 区を設け，これらを主区とした．分けつ肥は GS15（1 月 21 日）に施肥した．主区の中には，穂肥の窒素施肥量を第 3-2 表のように調整し，出穂前総

窒素施肥量が  $16 \text{ g m}^{-2}$ ,  $20 \text{ g m}^{-2}$ ,  $24 \text{ g m}^{-2}$  となるようにした副区を設けた。開花期追肥は、いずれの処理区も窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるように GS65 (2016 年 4 月 13 日) に施肥した。リンとカリは、成分量がそれぞれ  $7.2 \text{ g m}^{-2}$  となるよう前述の PK 化成 40 号を施用した。窒素、リン、カリ以外の基肥は、苦土入り石灰とミネラル G を  $100 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。

2016/17 年でも、2015/16 と同様の目的で試験 1 と試験 2 を行った。処理区は、試験 1 では 4 ブロックを乱塊法に従って配置し、試験 2 では 3 ブロックを分割区法に従って配置した。試験 1 の窒素施肥は、慣行分施肥区と穂肥重点施肥区のいずれも尿素を用い、第 3-2 表に示した通りに行った。開花期追肥は、いずれの処理区も窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう GS65 (2017 年 4 月 14 日) に尿素で施肥した (第 3-2 表)。試験 2 では、基肥と分けつ肥で窒素をそれぞれ  $5 \text{ g m}^{-2}$  および  $2 \text{ g m}^{-2}$  施肥した 5-2 区、 $0 \text{ g m}^{-2}$  および  $3 \text{ g m}^{-2}$  施肥した 0-3 区を設け、これらを主区とした。分けつ肥は GS14 (1 月 13 日) に施肥した。5-2 区と 0-3 区の中には、穂肥の窒素施肥量を調整し、出穂前総窒素施肥量が  $10 \text{ g m}^{-2}$  および  $16 \text{ g m}^{-2}$  となるようにした副区を設けた (第 3-2 表)。開花期追肥は、いずれの処理区も窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう GS65 (2017 年 4 月 14 日) に尿素で施肥した。リンとカリは、成分量がそれぞれ  $6.6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう前述の PK 化成 40 号を施用した。窒素、リン、カリ以外の基肥は、苦土入り石灰とミネラル G をそれぞれ  $200 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。

成長解析のためのサンプリングは、2015/16 年では GS30 (2 月 17 日), GS37 (3 月 17 日), 穂揃い期 (4 月 5 日, GS55) および成熟期 (6 月 3 日, GS92) に行った。2016/17 年では、GS30 (2 月 16 日), GS37 (3 月 22 日) および穂揃い期 (4 月 11 日, GS60) に行った。調査は、2015/16 年では窒素の施肥方法が極端に異なる 6-3 区と 0-6 区を対象に行い、中間的な 3-3 区は行わなかった。調査

内容は、緑面積指数（GAI：穂と稈の表面積および葉身向軸側面積の総和）と個体群成長速度（CGR）、純同化率（NAR）および地上部窒素蓄積量とした。調査した個体は、4 条を条に沿って 0.6 m の範囲で地際から刈り取り、葉身と稈+葉鞘、穂に分け、それぞれ乾物重を測定した。GAI は、それぞれの部位の一部のサンプルを用いて乾物重あたり表面積を葉面積計（林電工 AAM-8）で測定し、面積あたり乾物重を乗じて求めた。CGR と NAR は、作物調査基準の成長解析法（広田 2013）に従い求めた。

地上部窒素蓄積量は成長解析用のサンプルを用いて、部位ごとの窒素含有率をケルダール法（大山 1990）とインドフェノール法（大山 1990）で求め、部位ごとの面積当たり乾物重を乗じて求めた。

収量調査は、2014/15 年と 2015/16 年ではいずれも 6 月 3 日、2016/17 年では 6 月 2 日に行った。調査内容は、収量、収量構成要素、子実タンパク質含有率、成熟期の倒伏程度または草丈とした。収量、収量構成要素、子実タンパク質含有率と成熟期草丈の調査方法は、第 2 章と同様とした。倒伏程度は、作物調査基準の成長解析法（広田 2013）に従い調査した。

気象データは、山口大学農学部気象台測定装置で公開している 10 分ごとの観測値を用いた。平均気温は、10 分ごとの観測値を 24 時間ごとに平均して日平均気温とし、月の旬ごとの日平均気温を求めた。積算降水量は、観測値を旬ごとに積算して求めた。2014/15 年の 11 月下旬から 12 月中旬の平均気温に欠損値があったため、気象台の山口市における観測値を用いた。積算日照時間は、気象庁が公開している山口市の旬ごとの値を用いた。平年値はいずれも気象台の山口市における旬ごとの平年値を用いた。

統計処理は、2014/15 年では分散分析を行った後、Tukey の多重比較を行った。2015/16 年と 2016/17 年の試験 1 では対応がある場合の t 検定で解析し、試

験 2 では分散分析で解析した。

## 結果

第 3-3 表に山口大学農学部附属農場における 2014/15 年, 2015/16 年および 2016/17 年の旬ごとにみた日平均気温の平均値 (平均気温) と積算降水量および山口市の積算日照時間を示した。2014/15 年の 11 月下旬から 2 月下旬では, 平年値に比べて平均気温は 1.1~2.6℃低く, 積算降水量は 14%多く, 積算日照時間は 14%少なかった。3 月上旬から 4 月上旬では, 平年値に比べて平均気温は 1.3~2.1℃高く, 積算降水量と積算日照時間は平年並みであった。4 月中旬から 6 月上旬でも, 平年値に比べて平均気温は 0.4~2.6℃高く, 積算降水量は 14%少なく, 積算日照時間は 9%多かった。2015/16 年では, 平均気温の推移と積算日照時間は 2014/15 年と同様であったが, 4 月中旬から 6 月上旬の積算降水量が平年値に比べて 37%も多かった。2016/17 年でも平均気温の推移は 2014/15 年と同様であったが, 積算降水量は平年値に比べて 3 月上旬から 4 月上旬で 46%少なく, 4 月中旬から 6 月上旬で 30%少なかった。積算日照時間は, 11 月上旬から 4 月上旬では 2014/15 年と同様であったが, 4 月中旬から 6 月上旬では平年値に比べて 25%も長かった。

第 3-4 表には, 慣行分施と穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」の収量, 収量構成要素, 子実タンパク質含有率 (GPC) および成熟期草丈を示した (2014/15 年, 2015/16 年試験 1, 2016/17 年試験 1)。なお, 穂肥重点施肥区の出穂期は, 3 作期とも慣行分施区と同日であったが, 成熟期は 3 作期の平均で 3.3 日遅かった (データ省略)。

収量は, 2014/15 年ではいずれの出穂前総窒素施肥量においても慣行分施区と穂肥重点施肥区で同程度であったが, 出穂前総窒素施肥量が増加するにしたがって高まった。2015/16 年の試験 1 では, 穂肥重点施肥区で  $463 \text{ g m}^{-2}$  と慣行

分施肥区の  $418 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に多かった。2016/17 年の試験 1 でも、慣行分施肥区の  $388 \text{ g m}^{-2}$  に比べて穂肥重点施肥区が  $544 \text{ g m}^{-2}$  と有意に多かった。

全乾物重も収量と同様に、2014/15 年は慣行分施肥区と穂肥重点施肥区で同程度であったが、出穂前総窒素施肥量が多い処理区で有意に重くなった。2015/16 年と 2016/17 年では、いずれも穂肥重点施肥区が慣行分施肥区に比べて 8~23% 重かった。2014/15 年の収穫指数は、いずれの出穂前総窒素施肥量においても穂肥重点施肥区が慣行分施肥区に比べて 1.0~4.2 ポイント高くなる傾向があった。2015/16 年と 2016/17 年でも穂肥重点施肥で高く、2016/17 年では穂肥重点施肥区で 45.2% と、慣行分施肥区の 42.7% に比べて有意に高かった。

2014/15 年の穂数は、穂肥重点施肥区では基肥と分けつ肥を省略したが慣行分施肥区と同程度であった。また、慣行分施肥区と穂肥重点施肥区のいずれも出穂前総窒素施肥量を増やすと多くなる傾向があった。2015/16 年と 2016/17 年では、慣行分施肥区に比べて穂肥重点施肥区で 16~23% 有意に多くなった。一穂粒数は、いずれの作期も慣行分施肥区と穂肥重点施肥区で同程度であった。2014/15 年の千粒重は、いずれも約  $42 \text{ g}$  であった。2015/16 年では、いずれの処理区でも約  $36 \text{ g}$  であった。2016/17 年では、穂肥重点施肥区で  $42.5 \text{ g}$  と、慣行分施肥区の  $40.2 \text{ g}$  に比べて有意に重くなった。

2014/15 年の GPC は穂肥重点施肥区で高くなる傾向があり、出穂前総窒素施肥量  $10 \text{ g m}^{-2}$  と  $14 \text{ g m}^{-2}$  では慣行分施肥区に比べてそれぞれ 0.7 ポイントおよび 0.5 ポイント高かった。2015/16 年では慣行分施肥区と穂肥重点施肥区の間に有意な差はなかったが、いずれも 13% 以上とランク区分の基準値下限である 11.5% よりも高かった。2016/17 年では、穂肥重点施肥区で 10.6% と、慣行分施肥区に比べて 0.8 ポイント高い傾向があった。

第 3-5 表には、基肥や分けつ肥、穂肥に窒素を増肥した穂肥重点施肥で栽培

した「せときらら」（2015/16 年と 2016/17 年の試験 2）の収量, 収量構成要素, GPC および成熟期における倒伏程度を示した. 2015/16 年の収量は, 基肥と分けつ肥の割合を高くした 6-3 区や 3-3 区でも出穂前総窒素施肥量 3 水準の平均値が  $500 \text{ g m}^{-2}$  を上回らなかった. また, 出穂前総窒素施肥量を  $16 \text{ g m}^{-2}$  から  $24 \text{ g m}^{-2}$  に増やしても高まらなかった. 2016/17 年の収量は, 基肥と分けつ肥の割合を高くした 5-2 区に比べて 0-3 区で有意に高く約  $550 \text{ g m}^{-2}$  であった. 収量は, 5-2 区と 0-3 区のいずれも出穂前総窒素施肥量を  $10 \text{ g m}^{-2}$  から  $16 \text{ g m}^{-2}$  に増やしても高まらなかった.

2015/16 年の全乾物重は, 出穂前総窒素施肥量 3 水準の平均値が 6-3 区で  $1171 \text{ g m}^{-2}$ , 3-3 区で  $1071 \text{ g m}^{-2}$ , 0-6 区で  $1051 \text{ g m}^{-2}$  と 6-3 区で有意に重かった. 2016/17 年では 0-3 区で  $1087 \sim 1116 \text{ g m}^{-2}$ , 5-2 区で  $940 \sim 982 \text{ g m}^{-2}$  と 0-3 区で重くなる傾向があった. 2015/16 年の収穫指数は, 出穂前総窒素施肥量 3 水準の平均値が 6-3 区で 40.5%, 3-3 区で 43.3%, 0-6 区で 44.8% と, 基肥の窒素施肥量を減らすにしたがって高まる傾向があった. 2016/17 年でも基肥と分けつ肥の窒素施肥量を減らすにしたがって高まる傾向があった.

2015/16 年の穂数は, 3-3 区や 0-6 区に比べて 6-3 区で  $50 \text{ 本 m}^{-2}$  多くなる傾向があった. また, 出穂前総窒素施肥量を  $16 \text{ g m}^{-2}$  から  $24 \text{ g m}^{-2}$  まで増やすにしたがって増える傾向があった. 2016/17 年では, 0-3 区で約  $430 \text{ 本 m}^{-2}$  と 5-2 区に比べて多くなる傾向があった. 5-2 区と 0-3 区のいずれも, 出穂前総窒素施肥量を  $10 \text{ g m}^{-2}$  から  $16 \text{ g m}^{-2}$  に増やしても増えなかった. 2015/16 年の一穂粒数は処理による有意な差はなく, いずれの処理区も 32~35 粒であった. 2016/17 年でも処理による有意な差はなく,  $36.2 \sim 44.0$  粒であった. 2015/16 年の千粒重は, 6-3 区で  $34.1 \text{ g}$ , 3-3 区で  $35.3 \text{ g}$ , 0-6 区で  $36.0 \text{ g}$  と基肥の窒素施肥量が少ない区で重くなる傾向があった. 2016/17 年では, 0-3 区に比べ

て 5-2 区の出穂前総窒素施肥量  $16 \text{ g m}^{-2}$  区で軽くなる傾向があった。

2015/16 年の GPC は、いずれの処理区もランク区分基準値下限の 11.5%を超えていた。2016/17 年でも処理による有意な差はなく 10.0~11.6%であった。

2015/16 年の倒伏程度は、6-3 区で 3.9, 3-3 区で 3.5, 0-6 区で 3.1 と、基肥の窒素施肥量を減らすにしたがって有意に低下した。

第 3-6 表に基肥や分けつ肥、穂肥に窒素を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」（2015/16 年と 2016/17 年の試験 2）の NAR, GAI, CGR を示した。NAR は、いずれの年次でも GS30 から GS37 までや GS37 から GS55 までで、基肥を多く施肥した 6-3 区や 5-2 区に比べて 0-6 区や 0-3 区で高まる傾向があった。NAR は、GS30 から GS37 と GS37 から GS55 のいずれの期間でも出穂前総窒素施肥量を増やしても高まらなかった。2015/16 年の GAI は、GS30 と GS37 では、基肥の窒素施肥量が少ない 0-6 区で 6-3 区に比べて 27~63%低かったが、GS55 になると 0-6 区は 6-3 区と同水準となり、両処理区で  $10.1 \sim 11.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  となった。2016/17 年でも、GS60 には 5-2 区と 0-3 区のいずれも同程度となった。2015/16 年の CGR は、GS37 までは 0-6 区が 6-3 区に比べて低かったが、それ以降 GS55 までは 0-6 区で 6-3 区より 5~38%高かった。2016/17 年では、GS30~GS37 と GS37~GS60 のいずれも 5-2 区に比べて 0-3 区で高まる傾向があった。

第 3-1 図と第 3-2 図に、基肥や分けつ肥に窒素を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」における地上部窒素蓄積量の推移と成熟期の地上部窒素蓄積量を示した。2015/16 年の地上部窒素蓄積量は、GS30 と GS37 では 0-6 区に比べて 6-3 区で多い傾向があり、それぞれ 55%および 12~52%多かった。GS55 では、6-3 区に比べて 0-6 区で多い傾向があり、出穂前総窒素施肥量が  $20 \text{ g m}^{-2}$  の場合では  $2.1 \text{ g m}^{-2}$ 、出穂前総窒素施肥量が  $24 \text{ g m}^{-2}$  の場合では  $1.5 \text{ g m}^{-2}$



多かった。GS37 から GS55 にかけての増加量は 6-3 区で  $1 \text{ g m}^{-2}$  未満であったのに対し、0-6 区では約  $4 \text{ g m}^{-2}$  と多かった。GS92 の地上部窒素蓄積量は、0-6 区と 0-3 区のいずれもおおよそ  $16 \text{ g m}^{-2}$  であった。また、出穂前総窒素施肥量  $20 \text{ g m}^{-2}$  と  $24 \text{ g m}^{-2}$  のいずれも  $16 \text{ g m}^{-2}$  程度であった。GS92 の地上部窒素蓄積量は、2016/17 年ではいずれの出穂前総窒素施肥量でも 0-3 区が 5-2 区に比べて多い傾向があった。

## 考察

本章では、2014/15 年から 2016/17 年までの 3 作期にわたって、パン用コムギ品種「せときらら」において穂肥重点施肥の効果を検証した。また、穂肥重点施肥をベースに、基肥や分けつ肥、穂肥窒素の施肥量比率を変えるとともに、出穂前総窒素施肥量を増やすことによって一層収量や子実タンパク質含有率を高められるかどうかを検証した。

穂肥重点施肥は、「せときらら」でも収量を高めるために有効な栽培方法であると考えられた。穂肥重点施肥区は、穂数を確保するために重要である基肥や分けつ肥（和田 2002）の窒素施肥量を抑えたにもかかわらずむしろ穂数が増え、収量も高まった（第 3-4 表）。穂数は、穂肥窒素を増肥した場合（江口ら 1969, 倉井ら 1998, 土谷 2012）や、生育後期重点施肥により茎立ち期以降の NAR や CGR が高く維持された場合（渡邊ら 2016）に有効茎歩合が高まり、増加する。本章の試験 2 では、穂肥重点施肥のように基肥を施用せず穂肥窒素を増肥した処理区（2015/16 年作期の 0-6 区と 2016/17 年作期の 0-3 区）で、GS37 以降の NAR や CGR が高く維持された（第 3-6 表）。試験 1 の穂肥重点施肥区で穂数が多くなった原因は、試験 2 の 0-6 区や 0-3 区と同様に GS37 以降の乾物生産が高く維持され、有効茎歩合が高まったためと考えられた。

穂肥重点施肥は、「せときらら」のような多収のパン用コムギ品種でも品質を高められると考えられた。「せときらら」は、同様の方法で栽培した「ミナミノカオリ」や「ニシノカオリ」に比べて子実タンパク質含有率が2%以上低くなることもあるだけでなく、開花期追肥を窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  以上施肥しても、子実タンパク質含有率が11.5%を下回るため（高田ら 2017）、子実タンパク質含有率を高める栽培管理が必要な品種である。穂肥重点施肥区の子実タンパク質含有率は、収量が同水準の場合（2014/15 年）では慣行分施肥区に比べて高まる傾向があり、収量が高まった場合（2015/16 年，2016/17 年）でも低下しなかった（第3-4 表）。穂肥重点施肥区で子実タンパク質含有率が低下しなかった原因は、第2 章と同様に成熟期の地上部窒素蓄積量が穂肥重点施肥区で49%も多くなるためであった（2016/17 年作期，データ省略）。穂肥重点施肥をベースとした施肥体系では、他のパン用多収品種でも多収による子実タンパク質含有率の低下（江口ら 1969，岩淵ら 2011）を軽減できる可能性もある。

穂肥重点施肥は、倒伏のリスクを高めないと考えられた。これまでの研究では、茎立ち期の窒素追肥は収量を高めるが、稈長を伸ばし、倒伏の危険性を高めることが報告されている（江口ら 1969，倉井ら 1998，土谷 2012）。茎立ち期以降の窒素追肥が倒伏を助長するとしたこれらの報告は、いずれも基肥と分けつ肥を多く施肥する従来型の施肥体系に穂肥窒素を追肥する条件で試験している。第2 章では、「ミナミノカオリ」において基肥と分けつ肥を施肥しなかった場合、穂肥窒素を慣行分施肥の7.5 倍施肥しても、草丈が長くないことを明らかにしており（第2-2 表，第2-3 表）、倒伏は穂肥以前の窒素施肥量とも密接に関係すると考察した。本章の「せときらら」では、6-3 区や3-3 区のように穂肥重点施肥に基肥や分けつ肥として窒素を増肥したところ、倒伏程度は基肥と分けつ肥の窒素施肥量が多いほど高まった（第3-5 表）。倒伏程度が最も高

かった 6-3 区は、GS30 における GAI が 0-6 区に比べて約 2 倍も多かったことから（第 3-6 表）、これらの群落では、過繁茂となって穂肥を施肥する前に倒伏しやすい草姿（Mulder 1954, Pinthus 1973）になっていたと考えられる。倒伏を防ぎつつ窒素の吸収効率が高い穂肥（石丸ら 2016）を多く追肥するには、茎立ち開始期までの生育量を抑えることが重要である可能性が高いため、次章ではこの点について詳細に検証した。

一方で、穂肥重点施肥の効果を高めるためには、GS30 までに一定以上の生育量を確保することも重要であると考えられた。穂肥重点施肥区の収量は、慣行分施肥区に比べて 2015/16 年と 2016/17 年作期では有意に高まったが、2014/15 年作期では同程度であった（第 3-4 表）。2014/15 年作期は他の作期に比べて、播種日が 11 月下旬と遅かったこと、降雨により播種時の碎土性が悪く苗立ちが悪かったこと、播種直後の降水量が多かったこと（第 3-3 表）、分げつ肥を施肥しなかった（第 3-2 表）ことから、外観では GS30 までの初期生育が明らかに劣っていた。そのため、2015/16 年や 2016/17 年作期と異なり、穂数の増加に重要とされる小穂分化期（GS30 頃）の地上部窒素蓄積量や茎数（稲村ら 2007）が穂肥重点施肥でも十分に増加しなかったと考えられた。そこで第 6 章では、本章の 2014/15 年のような茎数不足を分げつ肥に窒素を追肥することによって補うことができるかどうか検証した。

本研究を行った圃場で収量  $500 \text{ g m}^{-2}$  をはるかに超える水準に達するためには、窒素施肥以外の要因も重要になると考えられた。「せときらら」は、山口県が多収事例で  $800 \text{ g m}^{-2}$  以上の収量が記録されている多収品種である（注：山口県農林総合技術センターによる現地調査の実績、金子和彦氏からの私信）。一方、本研究の「せときらら」の収量は、2015/16 年では出穂前総窒素施肥量を窒素成分で  $16 \text{ g m}^{-2}$  から  $24 \text{ g m}^{-2}$  に増肥しても  $500 \text{ g m}^{-2}$  程度と増加せず、2016/17 年

の出穂前総窒素施肥量  $16 \text{ g m}^{-2}$  区でも約  $550 \text{ g m}^{-2}$  であった (第 3-5 表). コムギの収量は, 成熟期における地上部窒素蓄積量と強い正の相関関係があるが (Hitz ら 2017), 本章における成熟期の地上部窒素蓄積量は, 2015/16 年ではいずれの出穂前総窒素施肥量においても  $16 \text{ g m}^{-2}$  程度と出穂前総窒素施肥量を増加させても同程度であり (第 3-1 図), 2016/17 年でも  $12 \text{ g m}^{-2}$  より多くならなかった (第 3-2 図). 収量と地上部窒素蓄積量は一定の窒素施肥量を超えて増肥しても増加しないため (Cui ら 2010), 収量や地上部窒素蓄積量をさらに高めるためにはバイオマスが高まりやすい播種様式や播種密度を明らかにする必要があると考えられた.

## 摘要

西南暖地向けパン用コムギ品種「せときらら」は収量が高いものの、子実タンパク質含有率が低くなりやすいという特徴がある。本研究では、「せときらら」の高品質多収化を目的として、基肥や分けつ肥を省略し、穂肥を増肥した穂肥重点施肥が、収量や収量構成要素、子実タンパク質含有率（GPC）におよぼす影響を検証した。また、穂肥重点施肥をベースとして、基肥や分けつ肥窒素の比率および出穂前総窒素施肥量を増やすことによって、収量や GPC を一層高められるかどうかを検証した。穂肥重点施肥区は、2015/16 年および 2016/17 年作期では収量が 11～40% 高まった。収量が高まった原因は、穂数が 16～23% 増加したためであった。穂肥重点施肥区の GPC は、収量が増加したにもかかわらず、いずれの作期も慣行分施肥区と同程度以上となった。一穂粒数は、いずれの作期でも穂肥重点施肥区で増加しなかったが、千粒重は出穂期から成熟期の積算降水量が少なく、積算日照時間が多い年次では穂肥重点施肥区が慣行分施肥区に比べて 2.3 g 重かった。穂肥重点施肥区の収量は、基肥や分けつ肥の窒素施肥量、出穂前総窒素施肥量を増やしても、500～550 g m<sup>-2</sup> までしか高まらなかった。成熟期の地上部窒素蓄積量も、出穂前総窒素施肥量を 10～24 g m<sup>-2</sup> まで増加させても 12～16 g m<sup>-2</sup> を上回らなかった。穂肥重点施肥は、「せときらら」のような多収パン用コムギ品種でも収量を高めつつ、子実タンパク質含有率の低下を防ぐことができたことから、多収パン用品種にも有効な施肥方法であると考えられる。

第 3-1 表 2014/15 年および 2015/16 年作期の試験圃場における作土の理化学性.

年次	pH (H <sub>2</sub> O)	全窒素 (g kg <sup>-1</sup> 乾土)	可給態リン酸 (g kg <sup>-1</sup> 乾土)	交換性塩基(g kg <sup>-1</sup> 乾土)		
				K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
2014/15 年	5.59	2.71	0.14	0.10	1.40	0.06
2015/16 年	5.35	2.93	0.01	0.03	6.35	0.07

分析した土壌は, 2015 年 1 月 19 日と 2016 年 3 月 20 日に表土下 10 cm までの作土から採取した.

第 3-2 表 2014/15 年, 2015/16 年および 2016/17 年における処理区ごとの窒素の施肥時期と施肥量 ( $\text{g m}^{-2}$ ).

		施肥時期					
処理区	出穂前総窒素施肥量	基肥	分けつ肥	穂肥Ⅰ	穂肥（慣行）	穂肥Ⅱ	開花期追肥
2014/15 年							
慣行分施肥区	6.0 g m <sup>-2</sup>	2.6	1.3	—	2.1	—	6.3
	10.0 g m <sup>-2</sup>	4.4	2.1	—	3.5	—	6.3
	14.0 g m <sup>-2</sup>	6.2	2.9	—	4.9	—	6.3
穂肥重点施肥区	6.0 g m <sup>-2</sup>	—	—	3.0	—	3.0	6.3
	10.0 g m <sup>-2</sup>	—	—	5.0	—	5.0	6.3
	14.0 g m <sup>-2</sup>	—	—	7.0	—	7.0	6.3
2015/16 年							
試験 1 慣行分施肥区	12.0 g m <sup>-2</sup>	4.0	3.0	—	5.0	—	6.0
穂肥重点施肥区	12.0 g m <sup>-2</sup>	—	3.0	6.0	—	3.0	6.0
試験 2 6－3 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	6.0	3.0	5.0	—	2.0	6.0
	20.0 g m <sup>-2</sup>	6.0	3.0	7.0	—	4.0	6.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	6.0	3.0	9.0	—	6.0	6.0
3－3 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	3.0	3.0	7.0	—	3.0	6.0
	20.0 g m <sup>-2</sup>	3.0	3.0	9.0	—	5.0	6.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	3.0	3.0	11.0	—	7.0	6.0
0－6 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	—	6.0	5.0	—	5.0	6.0
	20.0 g m <sup>-2</sup>	—	6.0	7.0	—	7.0	6.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	—	6.0	9.0	—	9.0	6.0
2016/17 年							
試験 1 慣行分施肥区	11.4 g m <sup>-2</sup>	5.0	2.0	—	3.0	1.4	6.0
穂肥重点施肥区	11.4 g m <sup>-2</sup>	—	3.4	8.0	—	—	6.0
試験 2 5－2 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	5.0	2.0	3.0	—	—	6.0
	16.0 g m <sup>-2</sup>	5.0	2.0	6.0	—	3.0	6.0
0－3 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	—	3.0	7.0	—	—	6.0
	16.0 g m <sup>-2</sup>	—	3.0	10.0	—	3.0	6.0

分けつ肥, 穂肥 I, 穂肥 (慣行), 穂肥 II はそれぞれ GS14, GS30, GS31, GS39 (Zadoks ら 1974) を目安に施肥した. 6-3 区は, 基肥と分けつ肥の窒素施肥量がそれぞれ  $6 \text{ g m}^{-2}$  と  $3 \text{ g m}^{-2}$ であることを示す.

第 3-3 表 山口大学農学部附属農場における 2014/15 年, 2015/16 年および 2016/17 年作期の旬ごとにみた日平均気温の平均値 (平均気温) と積算降水量および山口市の積算日照時間.

月	旬	2014/15 年			2015/16 年			2016/17 年		
		平均気温 (°C)	降水量 (mm)	日照時間 (時間)	平均気温 (°C)	降水量 (mm)	日照時間 (時間)	平均気温 (°C)	降水量 (mm)	日照時間 (時間)
11	上旬							11.0	12.5	56.1
	中旬				14.4	25.0	34.0	13.6	65.5	45.2
	下旬	13.1	59.5	39.4	10.2	10.0	35.2	10.2	34.5	36.1
12	上旬	5.1	31.5	27.9	8.8	91.5	39.8	7.2	17.0	48.6
	中旬	4.5	47.0	23.9	7.6	15.5	28.6	7.0	57.5	32.7
	下旬	3.5	3.5	52.8	5.8	14.0	47.6	7.1	66.5	32.9
1	上旬	3.6	15.5	49.2	5.6	0.5	31.0	5.2	25.5	43.5
	中旬	4.8	56.0	40.4	2.9	41.5	36.8	2.9	42.0	45.3
	下旬	5.4	53.5	24.2	2.7	49.5	22.1	3.0	34.0	52.9
2	上旬	2.6	18.0	30.3	3.4	5.0	54.7	4.1	29.5	40.3
	中旬	10.1	14.0	45.7	7.2	74.5	35.8	4.7	16.5	64.9
	下旬	12.5	41.0	26.4	4.2	11.0	34.6	5.4	57.5	35.9
3	上旬	5.0	46.0	37.0	9.7	44.0	39.3	5.6	14.5	51.4
	中旬	10.0	41.0	58.3	8.9	38.0	60.2	7.3	13.5	64.9
	下旬	9.7	0.0	96.9	8.4	0.5	80.9	8.3	36.5	45.3
4	上旬	14.3	135.5	27.9	15.0	116.5	39.4	12.8	49.5	35.8
	中旬	13.8	67.5	44.9	14.3	93.0	81.7	14.6	132.0	59.9
	下旬	15.5	10.0	90.2	15.9	131.0	54.7	14.9	30.5	86.2
5	上旬	18.0	44.0	77.3	17.9	133.0	62.1	18.0	24.0	62.6
	中旬	18.8	129.5	62.3	17.9	48.0	85.9	18.3	24.0	95.4
	下旬	22.2	6.5	93.6	21.4	43.0	68.3	20.4	0.5	99.9
6	上旬	22.3	58.0	50.0	21.3	51.0	52.5	20.0	44.0	78.5

平年値と比較した値は本文中に示す.



第 3-4 表 慣行分施と穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」の収量, 収量構成要素, 子実タンパク質含有率 (GPC) および成熟期草丈 (2014/15 年, 2015/16 年試験 1, 2016/17 年試験 1).

処理区	出穂前総 窒素施肥量	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾 物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫 指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)	草丈 (cm)
2014/15 年									
慣行分施区	6.0 g m <sup>-2</sup>	255a	588a	38.0	251	40.8	41.8	11.1	82.3
	10.0 g m <sup>-2</sup>	337ab	757ab	39.2	299	41.2	41.5	10.1	87.9
	14.0 g m <sup>-2</sup>	407b	843b	42.2	329	42.7	42.3	10.5	88.3
穂肥重点施肥区	6.0 g m <sup>-2</sup>	279ab	594a	41.1	250	43.0	41.5	10.6	80.7
	10.0 g m <sup>-2</sup>	398ab	797ab	43.4	301	44.9	41.6	10.8	81.7
	14.0 g m <sup>-2</sup>	421b	844b	43.6	332	43.6	41.8	11.0	84.9
2015/16 年									
慣行分施区	12.0 g m <sup>-2</sup>	418	951	40.3	380	40.4	36.6	13.1	—
穂肥重点施肥区	12.0 g m <sup>-2</sup>	463	1031	41.3	442	41.2	35.7	13.4	—
t検定		*	ns	ns	*	ns	ns	ns	—
2016/17 年									
慣行分施区	11.4 g m <sup>-2</sup>	388	864	42.7	342	38.0	40.2	9.8	—
穂肥重点施肥区	11.4 g m <sup>-2</sup>	544	1061	45.2	419	36.9	42.5	10.6	—
t検定		***	***	**	**	ns	***	ns	—

収量と千粒重は子実の含水率 12.5%に補正した値を示す. 英小文字が付された値は分散分析で有意差があることを示し, 異なる英小文字は Tukey の有意差検定において 5%水準で有意差があることを示す. \*, \*\*, \*\*\*は, t 検定でそれぞれ 5%, 1%, 0.1%水準の有意差があることを示す. —は, 未測定であることを示す.

第 3-5 表 基肥や分けつ肥，穂肥に窒素を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」（2015/16 年と 2016/17 年の試験 2）の収量，収量構成要素，子実タンパク質含有率（GPC）および成熟期における倒伏程度。

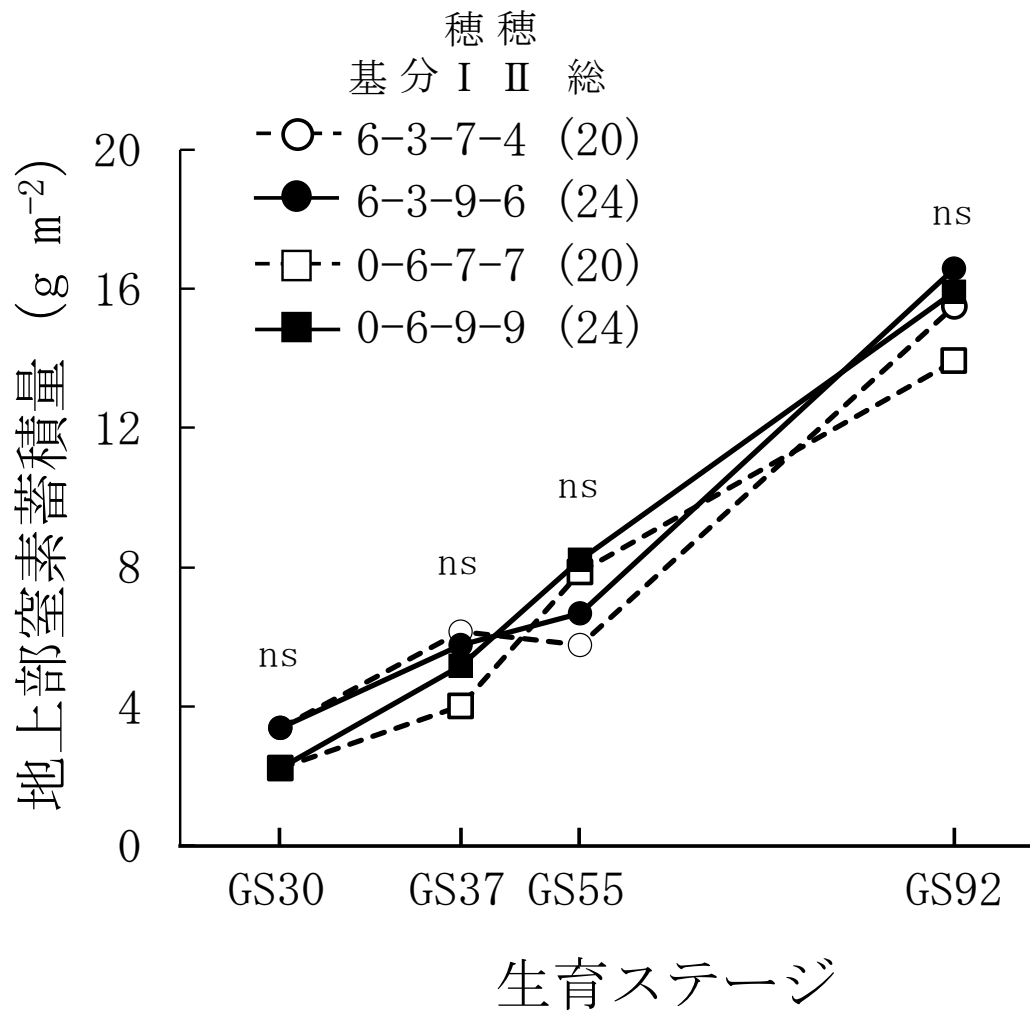
処理区	出穂前総 窒素施肥量	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾 物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫 指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)	倒伏程度 (0～5)
2015/16 年									
6-3 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	505	1160	40.6	465	33.9	34.7	12.0	3.7
	20.0 g m <sup>-2</sup>	509	1168	40.6	520	32.3	33.7	13.9	4.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	514	1186	40.4	524	32.0	33.8	13.9	4.0
3-3 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	481	1047	42.7	406	35.6	34.8	13.5	3.3
	20.0 g m <sup>-2</sup>	500	1063	43.5	419	34.1	35.2	13.0	3.3
	24.0 g m <sup>-2</sup>	521	1103	43.6	457	34.0	35.9	13.7	4.0
0-6 区	16.0 g m <sup>-2</sup>	487	1010	44.8	426	30.7	36.1	13.3	3.3
	20.0 g m <sup>-2</sup>	513	1059	44.9	465	33.0	35.7	13.3	3.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	525	1086	44.6	467	34.7	36.3	14.7	3.0
分散分析									
基肥一分げつ肥		ns	*	*	ns	ns	ns	ns	**
出穂前総窒素施肥量		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
交互作用		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2016/17 年									
5-2 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	418	940	39.3	356	36.2	42.0	10.4	—
	16.0 g m <sup>-2</sup>	455	982	40.7	388	44.0	38.2	11.6	—
0-3 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	554	1087	44.6	430	41.4	40.3	10.0	—
	16.0 g m <sup>-2</sup>	534	1116	41.9	420	40.1	40.2	10.8	—
分散分析									
基肥一分げつ肥		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—
出穂前総窒素施肥量		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—
交互作用		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	—

収量と千粒重は，子実の含水率 12.5%に補正した値を示す．\*，\*\*はそれぞれ分散分析で 5%，1%水準の有意差があることを示す．—は，未測定であることを示す．

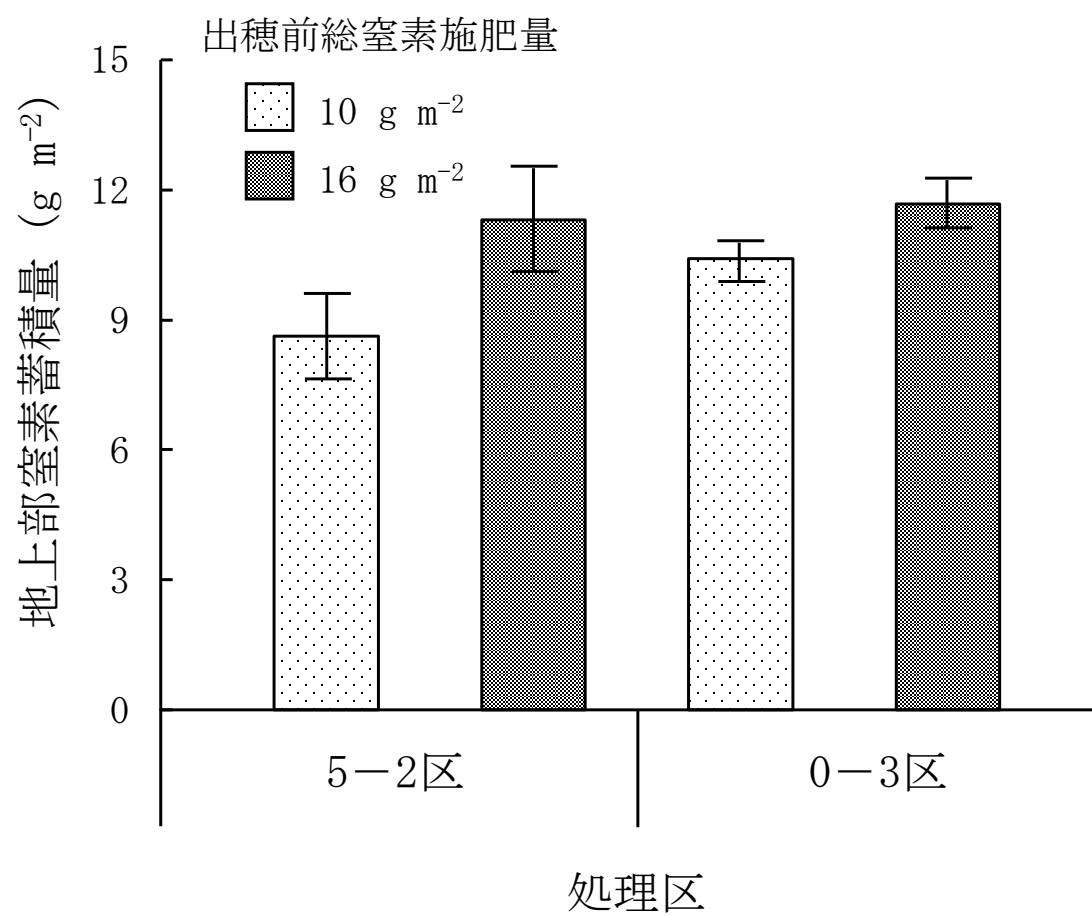
第 3-6 表 基肥や分けつ肥，穂肥に窒素を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」（2015/16 年と 2016/17 年の試験 2）の純同化率（NAR），緑面積指数（GAI）および個体群成長速度（CGR）.

出穂前総窒素		NAR		GAI			CGR	
処理区	施肥量	GS30～GS37	GS37～GS55	GS30	GS37	GS55	GS30～GS37	GS37～GS55
2015/16 年								
6-3 区	20.0 g m <sup>-2</sup>	1.6	1.4	3.1	8.3a	10.5	8.2	13.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	1.6	1.6	3.1	7.0ab	11.3	7.4	14.6
0-6 区	20.0 g m <sup>-2</sup>	2.2	2.4	1.6	5.1c	10.5	6.7	18.0
	24.0 g m <sup>-2</sup>	2.1	2.0	1.6	5.5bc	10.1	6.5	15.3
		GS30～GS37	GS37～GS60	GS30	GS37	GS60	GS30～GS37	GS37～GS60
2016/17 年								
5-2 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	1.8	1.9	1.0	3.8	6.3	5.9	9.8
	16.0 g m <sup>-2</sup>	1.7	2.3	1.0	3.7	7.2	5.4	12.0
0-3 区	10.0 g m <sup>-2</sup>	2.0	2.2	1.0	4.0	7.9	6.6	12.5
	16.0 g m <sup>-2</sup>	1.5	2.7	1.0	3.5	8.4	4.6	15.3

2015/16 年の GS30, GS37, GS55 はそれぞれ 2016 年 2 月 17 日, 3 月 17 日, 4 月 5 日であった. 2016/17 年の GS30, GS37, GS60 はそれぞれ 2017 年 2 月 16 日, 3 月 22 日, 4 月 11 日であった. 英小文字が付された値は, 分散分析で有意差があることを示し, 異なる英小文字は Tukey の有意差検定において 5%水準で有意差があることを示す.



第 3-1 図 2015/16 年作期に基肥と分けつ肥を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」における地上部窒素蓄積量の推移. GS30, GS37, GS55, GS92 はそれぞれ 2016 年 2 月 17 日, 3 月 17 日, 4 月 5 日, 6 月 3 日であった. 凡例の基, 分, 穂 I, 穂 II は, それぞれ基肥, 分けつ肥, 穂肥 I, 穂肥 II の窒素施肥量を示し, 総は出穂前総窒素施肥量を示す. ns は分散分析の結果, 処理による有意な差がないことを示す.



第 3-2 図 2016/17 年作期に基肥と分けつ肥を増肥した穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」の GS92 における地上部窒素蓄積量.

## 第 4 章 茎立ち期の光競合がコムギの倒伏程度および倒伏に関係する形質におよぼす影響

### 緒言

コムギの収量は、地上部窒素蓄積量に比例して高まるが (Hitz ら 2017), 窒素を多投入できない主な制限要因は倒伏である. コムギの地上部窒素蓄積量を高めるためには、窒素の吸収効率が高い茎立ち期以降の窒素追肥 (石丸ら 2016) の量を増やすことが有効である. しかし、茎立ち期以降の窒素追肥は、稈長を伸ばすことによって倒伏を助長することが知られている (倉井ら 1998). 倒伏は、発生すると最大で 35% も収量を低下させてしまうため (Fischer and Stapper 1987), 収量を高めるには倒伏を防ぎつつ茎立ち期以降に窒素を多投入できる栽培管理が必要となる.

本研究では、倒伏を助長する直接的な原因は、茎立ち期以降の窒素追肥ではない可能性を指摘した. 第 2 章において、「ミナミノカオリ」の草丈は、茎立ち開始期以降に窒素を慣行分施に比べて 3 倍以上も施用した穂肥重点施肥区でむしろ低くなった (第 2-3 表). また、第 3 章の「せときらら」では、倒伏程度が茎立ち開始期の緑面積指数 (GAI) が低かった群落で低かった (第 3-5 表, 第 3-6 表). 茎立ち期に光競合が起こりにくい群落は、稈長が短くなることが知られているが (Mulder 1954, Pinthus 1973), これまでに窒素追肥と光競合、倒伏の相互作用を検証した研究は少ない.

光競合は、コムギの稈の強度を低下させることによって倒伏を助長する可能性もある. コムギの稈の強度は、下位の伸長節間 (下位節間) におけるリグニン含有率と正の相関関係がある (松山ら 2014). これまでの研究では、下位節間のリグニン含有率は基肥に窒素を多く施用すること (Chen ら 2018) や播種密度を高めることによって低下すること (Zheng ら 2017) が報告されている.

基肥に窒素を多く施用することや播種密度を高めることは、群落内の光競合を助長する可能性が高く、これまでの研究でリグニン含有率が低下した原因も光競合である可能性がある。

第4章では、慣行的な施肥体系の中で茎立ち期の窒素追肥が倒伏を誘導する直接的な原因は、窒素追肥により節間の伸長が促進されるためでなく、茎立ち期に群落内で光競合が起こるためと考え、播種密度や窒素施肥によって茎立ち期までの群落の成長量を異にした群落や、分けつ期および茎立ち期に遮光処理した群落においてこの仮説を検証した。また、これまでの研究では稈長や節間長、節間の強度に関係する形質を測定する際、無作為に選んだ茎 (Zheng ら 2017) または、主茎のみを対象としていた (松山ら 2014, Xiao ら 2015, Piñera-Chavez ら 2016)。本研究では、より詳細に稈長や節間長、強度に関係する形質を調べるため、茎を発生節位ごとに分けて調査した。

## 材料と方法

試験は、2016/17 年と 2017/18 年の 2 作期にわたり、山口大学農学部附属農場 (北緯 34 度 15 分, 東経 131 度 47 分) で行った。栽培様式は、第3章と同様の畝たて様式とした。播種は、2016 年 11 月 7 日と 2017 年 11 月 13 日に手作業で行った。いずれの作期も播種直前に PK 化成 40 号 ( $P_2O_5$ : 20%,  $K_2O$ : 20%) を用いて、リン成分とカリ成分でそれぞれ  $10\text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。また、2016/17 年ではミネラルGを  $100\text{ g m}^{-2}$  と牛糞堆肥 (N:0.67%, P:1.99%, K:1.27%) を  $1.3\text{ kg m}^{-2}$  施用した。

処理区は、2016/17 年では品種 2 水準 (せときらら, ミナミノカオリ) と播種密度 2 水準 ( $200\text{ 粒 m}^{-2}$ ,  $400\text{ 粒 m}^{-2}$ ), 窒素追肥時期 3 水準 [分けつ肥 (GS14), 穂肥 I (GS30), 穂肥 II (GS37)] を組み合わせた 12 水準とした。処理区の配

置は、3 反復の乱塊法とした。ベースとなる窒素施肥は、いずれの処理区も GS30 と GS37 にそれぞれ窒素成分で  $5 \text{ g m}^{-2}$  ずつ尿素を施用する穂肥重点施肥とした。窒素追肥は、これにさらに窒素成分で GS14、GS30 または GS37 にそれぞれ  $5 \text{ g m}^{-2}$  を尿素で施用した。それぞれのプロット内には、副プロットとして GS14 から GS30 まで遮光した分けつ期遮光区と GS30 から GS37 まで遮光した茎立ち期遮光区の計 2 水準の遮光処理区も設けた。遮光処理は、ラッセル遮光網（ダイオ化成）を用いた（第 4-1 図）。処理期間中は、畝の長さ 0.75 m 分の群落を覆えるように園芸用トンネル支柱で骨組みをつくり、蚊帳状に遮光網を吊り下げて群落を被覆した。

2017/18 年では、6 処理区を 3 反復の乱塊法に従って配置した。処理区 1 は前期重点施肥区とし、窒素を基肥と GS14 に  $5 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用し、GS30 と GS37 に  $2.5 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。処理区 2 は後期重点施肥区とし、窒素を基肥と分けつ肥に施用せず、GS30 と GS37 にそれぞれ  $5 \text{ g m}^{-2}$  および  $10 \text{ g m}^{-2}$  施用した。その他の処理区（処理区 3～6）も後期重点施肥区と同様の窒素施肥量および窒素施肥時期とした。処理区 3 は 4 条密植区とし、播種密度が  $400 \text{ 粒 m}^{-2}$  の 4 条播き（条間 0.3 m）とした。処理区 4 は 8 条密植区とし、播種密度が  $400 \text{ 粒 m}^{-2}$  の 8 条播き（条間 0.15 m）とした。8 条密植区の種子の間隔は、播種密度を変えずに条数を増やすことによって、4 条密植区の 2 倍となっていた。処理区 3 と 4 以外の処理区は、いずれも播種密度を  $200 \text{ 粒 m}^{-2}$  とした。処理区 5 は分けつ期遮光区とし、処理区 6 は茎立ち期遮光区とした。それぞれの遮光時期は 2016/17 年と同様とした。

遮光ネットの遮光率は、Field Lamda II（Carl Zeiss 社）を用いて太陽光と遮光処理区の内部における波長ごとの光量子束密度を測定して算出した。

生育量の調査は、2017/18 年の茎立ち開始期（GS30）に行った。調査項目は、



地上部乾物重と稈長，葉面積指数（LAI），緑面積指数（GAI）およびコムギによる畝上の被覆率（以下被覆率）とした．サンプルは4条を条に沿って0.5 m刈り取り，それらを葉身と稈+葉鞘に分けた．分けた葉身は，葉面積計（林電工AAM-3）で葉面積を測定し，LAIを算出した．稈+葉鞘も葉面積計で投影面積を測定し，投影面積に $\pi$ を乗することによって表面積を算出した．稈の表面積とLAIを合算してGAIとした．

被覆率は，土壌表面から1 mの高さで撮影した群落の画像を用いて，画像解析ソフト（Image-J，ver1.52a）で求めた．

成熟期には，収量と収量構成要素，子実タンパク質含有率を調査した．調査方法は，第2章と同様とした．また，作物調査基準の成長解析法（広田 2013）に従い倒伏程度も調査した．

稈長と節間長，節間1 cmあたり乾物重は，2016/17年では成熟期に調査し，2017/18年では開花2週間後に調査した．サンプルは，10株以上を無作為に抜き取り，それらの茎を発生節位ごとに主茎，主茎第1節分げつ，主茎第2節分げつに分けた．その中からそれぞれ中庸な長さの8本を選び取り，節間長が3 mm以上あるものを伸長節間として切り分け，それぞれ節間長を測った．伸長節間は，最も下位の節位を第1節間とした．節間のサンプルは，節間長を測定した後70℃の乾燥機で48時間以上乾燥させ，乾物重を量った．節間の乾物重を節間長で除することにより節間1 cmあたり乾物重を算出した．

節間のリグニン含有率は，節間長と節間1 cmあたり乾物重を求めたサンプルを供試して測定した．測定方法は，Suzuki ら（2009）の方法に従った．

2016/17年の統計解析は，一次要因である品種と播種密度，窒素追肥時期では分散分析を行った．二次要因である遮光処理は，分散分析をした後，有意差があったものにはTukeyの多重比較を行った．2017/18年では分散分析をした後，

有意差があったものには Tukey の多重比較を行った。

## 結果

第 4-1 表には、品種や播種密度、窒素の追肥時期が 2016/17 年の成熟期における稈長や節間長、節間 1 cm あたり乾物重におよぼす影響を示した。表の値は、各水準の平均値を示す。例えば、「せときらら」の値は、播種密度と窒素の追肥時期に関係なく「せときらら」を用いたプロットすべての平均値を表している。

「せときらら」の第 1 節間から第 3 節間は、「ミナミノカオリ」に比べて節間長が 8～19% 長く、節間 1 cm あたり乾物重が 21% 重かった。密植（400 粒  $\text{m}^{-2}$ ）区は、倒伏程度が標準播種量（200 粒  $\text{m}^{-2}$ ）区に比べて有意に高かった。密植区の節間長は、いずれの節間も標準播種量区と同程度であった。密植区の節間 1 cm あたり乾物重は、第 1 節間から第 3 節間のいずれも標準播種量区に比べて有意に軽かった。窒素の追肥時期では、第 3 節間の節間長が GS14 追肥区で GS30 追肥区に比べて有意に長かった。その他の節間の節間長と節間 1 cm あたり乾物重は追肥時期による有意な差がなかった。

第 4-2 表には、2017/18 年における窒素の施肥時期と条数が茎立ち開始期（GS30）の地上部乾物重と稈長、葉面積指数（LAI）、緑面積指数（GAI）、被覆率および成熟期の倒伏程度におよぼす影響を示した。後期重点施肥区は、地上部乾物重が 71.2 g  $\text{m}^{-2}$  と前期重点施肥区に比べて有意に軽かった。稈長は、後期重点施肥区が前期重点施肥区に比べて 20% 短くなる傾向があった。LAI と GAI は、後期重点施肥区がそれぞれ 1.22  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  および 1.91  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  と、前期重点施肥区の 2.03  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  および 3.46  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  に比べて低かった。後期重点施肥区の被覆率は 33.1% と、前期重点施肥区の 51.2% に比べて有意に低かった。成熟期の倒伏程度は、後期重点施肥区で 1.7 と前期重点施肥区の 3.7 に比べて低い傾向があっ

た. 4 条密植区と 8 条密植区は, GS30 の地上部乾物重と稈長, LAI, GAI, 被覆率および成熟期の倒伏程度のいずれも同程度であった.

第 4-3 表には, 2017/18 年における窒素の施肥時期が主茎と分げつの稈長や節間長, 節間 1 cm あたり乾物重におよぼす影響を示した. 主茎と分げつの稈長は, いずれも窒素の施肥時期に関係なく同程度であった. 主茎では, 節間長と節間 1 cm あたり乾物重もいずれの窒素施肥時期でも同程度であった. 主茎第 1 節分げつでは, 第 1 節間と第 2 節間の節間長が後期重点施肥区で 42.4 mm および 96.2 mm と前期重点施肥区に比べて有意に短かった. 節間 1 cm あたり乾物重は, 後期重点施肥区が前期重点施肥区に比べて 3~12% 重くなる傾向があった. 主茎第 2 節分げつでも, 第 1 節間と第 2 節間の節間長が後期重点施肥区で有意に短かった. 節間 1 cm あたり乾物重も後期重点施肥区で 9~21% 重くなる傾向があった.

第 4-4 表には, 2017/18 年における窒素の施肥時期と条数が収量, 収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC) におよぼす影響を示した. 収量は, いずれの処理区も約 450 g m<sup>-2</sup> であった. 全乾物重は, 後期重点施肥区が 1060 g m<sup>-2</sup> と前期重点施肥区の 1293 g m<sup>-2</sup> に比べて有意に軽かった. 収穫指数は, 後期重点施肥で栽培した処理区が 34.1%~36.9% と前期重点施肥区に比べて高かった. 穂数は, 後期重点施肥区が前期重点施肥区に比べて 14% 有意に少なかった. 一穂粒数は, いずれの処理区も 32.0~37.3 粒であった. 千粒重は, 後期重点施肥で栽培した処理区が前期重点施肥区に比べて約 5 g 重くなる傾向があった. GPC は, 後期重点施肥で栽培した処理区がいずれも約 13% と前期重点施肥区の 11.1% に比べて高くなる傾向があった. 4 条密植区と 8 条密植区は, 収量と収量構成要素のいずれも同程度であった.

第 4-5 表には, 2016/17 年と 2017/18 年の 2 作期における遮光処理が稈長,

節間長および節間 1 cm あたり乾物重におよぼす影響を示した。2016/17 年の稈長は、いずれの遮光時期でも約 720 mm であった。分けつ期 (GS14~GS30) 遮光区は、第 1 節間長が無遮光区に比べて有意に長かったが、その他の節間の長さは同程度であった。茎立ち期 (GS30~GS37) 遮光区は、第 2 節間と第 3 節間の節間長がそれぞれ 76.6 mm および 110.0 mm と無遮光区の 58.2 mm および 90.6 mm に比べて有意に長く、節間 1 cm あたり乾物重が有意に軽かった。2017/18 年の主茎では、茎立ち期遮光区は無遮光区と分けつ期遮光区に比べて第 1 節間長が有意に長かった。第 2 節間と第 3 節間は、遮光処理の効果が 2016/17 年と同様であった。分けつでは、第 3 節間と第 3 節間より上位の節間長が無遮光区に比べて茎立ち期遮光区で有意に短かった。茎立ち期遮光区の節間 1 cm あたり乾物重は、いずれの節間においても無遮光区に比べて有意に軽かった。

第 4-2 図には、2017/18 年における窒素の施肥時期や播種密度、条数および遮光時期が開花 2 週間後の茎のリグニン含有率と節間 1 cm あたりリグニン含有量におよぼす影響を示した。主茎では、リグニン含有率はいずれの処理区も同程度で第 1 節間から第 3 節間がそれぞれ約 17%、約 16%、約 15% であった。節間 1 cm あたりリグニン含有量は、窒素の施肥時期と播種密度、条数に関係なく、いずれも同程度であった。茎立ち期遮光区では、節間 1 cm あたりリグニン含有量が無遮光区（後期重点施肥区）に比べて 25% 有意に少なかった。分けつでは、リグニン含有率は、第 1 節間から第 3 節間のいずれでも茎立ち期遮光区が他の処理区に比べて最も高かった。節間 1 cm あたりリグニン含有量は、茎立ち期遮光区では節間 1 cm あたり乾物重が軽かったため、無遮光区に比べて有意に少なかった。4 条密植区でも、節間 1 cm あたり乾物重が軽くなったことによって後期重点施肥区に比べて有意に少なかった。後期重点施肥区では、第 1 節間と第 2 節間のいずれも前期重点施肥区に比べて 20% 多くなる傾向があった。8 条密植

区では、4条密植区に比べて20%多くなる傾向があった。

## 考察

茎立ち期の窒素追肥は収量を高めるために有効であるが、倒伏の危険性も高めてしまう（倉井ら 1998, 土谷 2012）。一方で、これらは茎立ち期以前に多くの窒素を施用した状態で行われた研究であり、基肥や分けつ肥によって光競合が起きやすい群落（Mulder 1954, Pinthus 1973）となっていた可能性もある。本研究では、倒伏を助長する直接的な原因は茎立ち期中の窒素追肥ではなく、茎立ち期の群落における光競合であると考え、この仮説を検証した。

倒伏は、茎立ち期に窒素を多量に追肥することよりも茎立ち期中（GS30～GS37）の光競合によって助長されることが明らかとなった。後期重点施肥区の倒伏程度は、茎立ち期中に窒素を前期重点施肥区の3倍も多く施用したにも関わらず低かった（第4-1表, 第4-2表）。耐倒伏性は、下位の節間長が短く（Pinthus 1973）、節間1 cmあたり乾物重が重く（Piñera-Chaves ら 2016, Zheng ら 2017）、リグニン含有率が高く（松山ら 2014, Zheng ら 2017）、節間1 cmあたりリグニン含有量が多い（Zhang ら 2016）と高いことがこれまでに報告されている。主茎や分けつでは、第1節間と第2節間の長さが前期重点施肥区と茎立ち期（GS30～GS37）遮光区で長かった（第4-3表, 第4-5表）。前期重点施肥区と茎立ち期遮光区では、節間1 cmあたり乾物重が軽く（第4-3表, 第4-5表）、節間1 cmあたりリグニン含有量も少なかった（第4-2図）。前期重点施肥区は、GS30における被覆率や葉面積指数（LAI）、緑面積指数（GAI）が後期重点施肥区に比べて高く（第4-2表）、光競合が起きやすい群落となっていた。倒伏させずに茎立ち期に窒素を多投入するためには、茎立ち期中の光競合が起きにくいようGS30以前の生育を抑える必要があると考えられた。

後期重点施肥は、倒伏の危険性を低下させつつ多収、高子実タンパク質含有率を達成するために有効な栽培方法であった。茎立ち期の窒素追肥は、穂数を増やすことによって収量を高めるが、同時に稈長が長くなることによって倒伏の危険性が高まってしまう（倉井ら 1998, 土谷 2012）。そのため、日本ではこれまで倒伏を避けつつ収量を高めるため、茎数を増やすために有効な基肥や分けつ肥（和田 2002）を多く施用する栽培方法が一般的となってきた。一方、第 2 章と第 3 章で示したように基肥と分けつ肥を省略した穂肥重点施肥では穂数を増やすことによって収量を高めたが、草丈や倒伏程度を高めなかった（第 2-3 表, 第 3-4 表, 第 3-5 表）。本章では、後期重点施肥区の穂数は前期重点施肥区に比べて少なくなったが、収量は同等以上となった（第 4-4 表）。これは、後期重点施肥区では倒伏程度が低く（第 4-2 表）、千粒重が前期重点施肥区より 5 g も重かったためであった（第 4-4 表）。千粒重は、開花後の倒伏によって減少し、収量を低下させることが知られており（Fischer and Stapper 1987, Berry and Spink 2012）、本章の前期重点施肥区は、開花約 3 週間後から倒伏程度が大きくなった（データ省略）。また、子実タンパク質含有率は千粒重が重いと高くなりにくいにもかかわらず（岩渕ら 2011）、後期重点施肥区が 1.6 ポイントも高かった（第 4-4 表）。

密植区で倒伏程度が高かった原因は、節間 1 cm あたり乾物重と節間 1 cm あたりリグニン含有量が減少することによって（第 4-1 表, 第 4-2 図）、稈の強度が低下したためであった。これまでの研究では、播種密度を高めると稈長や節間長が長くなることによって倒伏が助長されると報告されている（Pinthus 1973, 及川 1996, Xiao ら 2015, Ma ら 2018）。これは、播種密度を高めることによって群落内の遮光程度が高まるためであるが（Pinthus 1973）、本研究の密植区では標準播種量区と同程度の LAI や GAI であったことから（第 4-2 表）、光競合が

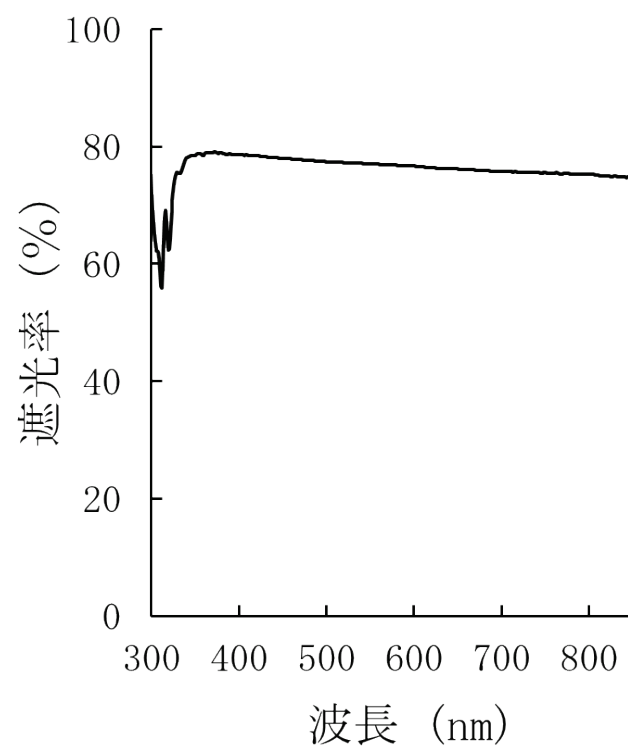
起きにくく、稈長や節間長が伸びなかったと考えられた。播種密度を高めることは、本研究と同様に節間 1 cm あたり乾物重や下位節間の直径を減らすことによって強度を低下させることがこれまでも報告されているが (Xiao ら 2015, Zheng ら 2017), 原因は明らかになっていないため今後より詳細な検証が必要である。

稈の化学的な強度は、茎立ち期中の受光量を増やすことによって高まる可能性がある。稈の強度は、リグニン含有率と正の相関関係があるが (松山ら 2014), リグニン含有率は播種密度を高めることによって低下する (Zheng ら 2017)。本研究では、4 条密植区でリグニン含有率は低下しなかったが、節間 1 cm あたりリグニン含有量は減少した (第 4-2 図)。節間 1 cm あたりリグニン含有量は、茎立ち期中の受光量を極端に減らした茎立ち期遮光区でも著しく減少した (第 4-2 図)。一方、8 条密植区は播種密度が同じにもかかわらず、4 条密植区に比べて節間 1 cm あたりリグニン含有量が約 20% も多かった (第 4-2 図)。8 条密植区は、4 条密植区に比べてコムギ個体の間隔が 2 倍広いことから、LAI や GAI は同等でも茎立ち期中の受光量が多くなりやすい群落であったと考えられる。Dong ら (2014) は、コムギのリグニン含有率は光の影響を受けやすいことを報告しているが、光とリグニン代謝の関係を対象にした研究は非常に少ない。より耐倒伏性が高い栽培方法を明らかにするためには、光とリグニンの蓄積についてもより詳細な研究を行う必要があると考えられる。

## 摘要

茎立ち開始期に窒素を追肥することは、コムギの収量を高めるために有効であるが、同時に稈長を伸ばすことによって倒伏の危険性も高める。倒伏は、発生すると収量を低下させてしまうため、多収を達成するためには倒伏を助長せず茎立ち期に多くの窒素を投入できる栽培体系が必要となる。本研究では、倒伏を助長する原因は茎立ち期の窒素追肥ではなく、過繁茂となった群落による光競合であると考え、この仮説を検証した。成熟期の倒伏程度は、茎立ち期に窒素を多く施肥した後期重点施肥区よりも茎立ち期以前に重点的に窒素を施肥した前期重点施肥区で高かった。前期重点施肥区で倒伏程度が高かった原因は、分けつにおける下位の伸長節間長が後期重点施肥区に比べて有意に長かったためであった。前期重点施肥区は、後期重点施肥区に比べて茎立ち開始期の地上部乾物重が75%重く、葉面積指数と緑面積指数がそれぞれ66%および81%も高かったことから、茎立ち期中に光競合が発生しやすかったと考えられる。茎立ち期に遮光処理を施した区でも下位の伸長節間長が有意に長くなっていた。倒伏は、茎立ち期以前の窒素施肥を省略し、茎立ち期の光競合を緩和することによって、茎立ち期に窒素を多く追肥しても節間長をむしろ短くすることによって軽減できると考えられた。





第 4-1 図 ラッセル遮光網における波長ごとの遮光率.

第4-1表 品種や播種密度、窒素の追肥時期が2016/17年の成熟期における稈長や節間長、節間1 cmあたり乾物重におよぼす影響.

要因	水準	倒伏 程度 (0-5)	稈長 (mm)	節間長 (mm)			節間 1 cm あたり乾物重 (mg cm <sup>-1</sup> )				
				第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 3 節間 より上位	第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 3 節間 より上位
品種	せときらら	3.1	740	31.9	62.9	94.4	551	19.1	19.7	17.7	11.4
	ミナミノカオリ	2.9	700	26.6	53.5	86.8	533	15.8	16.3	14.6	9.5
	200 粒 m <sup>-2</sup>	1.5	733	28.3	56.8	87.4	560	19.7	20.5	18.2	11.2
	400 粒 m <sup>-2</sup>	4.5	707	30.2	69.6	93.8	524	15.2	16.5	14.1	9.8
窒素追肥時期	GS14	4.0	748	31.9	61.4	100.0	555	17.3	18.5	16.5	10.3
	GS30	2.6	695	27.5	51.9	81.8	534	17.7	17.9	16.4	10.6
	GS37	2.4	717	28.4	61.2	90.0	537	17.3	17.6	15.5	10.5
分散分析	品種	NS	NS	*	*	NS	NS	**	NS	**	**
	播種密度	***	NS	NS	NS	NS	*	***	*	***	*
	窒素追肥時期	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS

GS は, Zadoks ら (1974) の生育ステージを示す. \*, \*\*, \*\*\*は, それぞれ分散分析において5%, 1%, 0.1%水準で有意差があることを示す. 交互作用は, いずれの水準間においても検出されなかったため, 省略した.

第 4-2 表 2017/18 年における窒素の施肥時期と条数が茎立ち開始期（GS30）の地上部乾物重と稈長，葉面積指数（LAI），緑面積指数（GAI），被覆率および成熟期の倒伏程度におよぼす影響。

処理区	施肥時期	播種密度	地上部乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	稈長 (mm)	LAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	GAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	被覆率 (%)	倒伏程度 (0-5)
前期重点施肥	前期重点施肥	200 粒 m <sup>-2</sup>	123a	96.7a	2.03	3.46a	51.2a	3.7
後期重点施肥	後期重点施肥	200 粒 m <sup>-2</sup>	71b	77.2ab	1.22	1.91b	33.1b	1.7
4 条密植	後期重点施肥	400 粒 m <sup>-2</sup>	85ab	69.9b	1.45	2.19ab	45.4ab	3.0
8 条密植	後期重点施肥	400 粒 m <sup>-2</sup>	93ab	71.6b	1.53	2.43ab	47.0a	2.7

異なる英小文字を付された値は，Tukey の多重比較において 5%水準の有意差があることを示す。

第 4-3 表 2017/18 年における窒素の施肥時期が主茎と分げつの稈長や節間長、節間 1 cm あたり乾物重におよぼす影響.

発生節位	施肥時期	稈長 (mm)	節間長 (mm)				節間 1 cm あたり 乾物重 (mg cm <sup>-1</sup> )			
			第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 3 節間 より上位	第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 3 節間 より上位
主茎	前期重点施肥	900	36.0	93.4	129	771	31.0	29.4	26.5	16.3
	後期重点施肥	905	37.9	91.9	143	733	30.2	30.8	26.7	16.3
	分散分析	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
主茎第 1 節分げつ	前期重点施肥	868	58.2	108.6	157	702	23.3	21.9	20.3	13.3
	後期重点施肥	842	42.4	96.2	178	704	25.8	24.6	20.9	12.5
	分散分析	ns	*	**	*	ns	ns	ns	ns	ns
主茎第 2 節分げつ	前期重点施肥	850	45.9	103.9	140	701	20.7	19.0	18.2	11.9
	後期重点施肥	824	34.0	89.1	170	701	24.3	23.5	20.0	12.0
	分散分析	ns	*	***	*	ns	ns	ns	ns	ns

\*, \*\*, \*\*\*は、それぞれ分散分析において 5%, 1%, 0.1%水準で有意差があることを示す.

第 4-4 表 2017/18 年における窒素の施肥時期と条数が収量，収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC) におよぼす影響

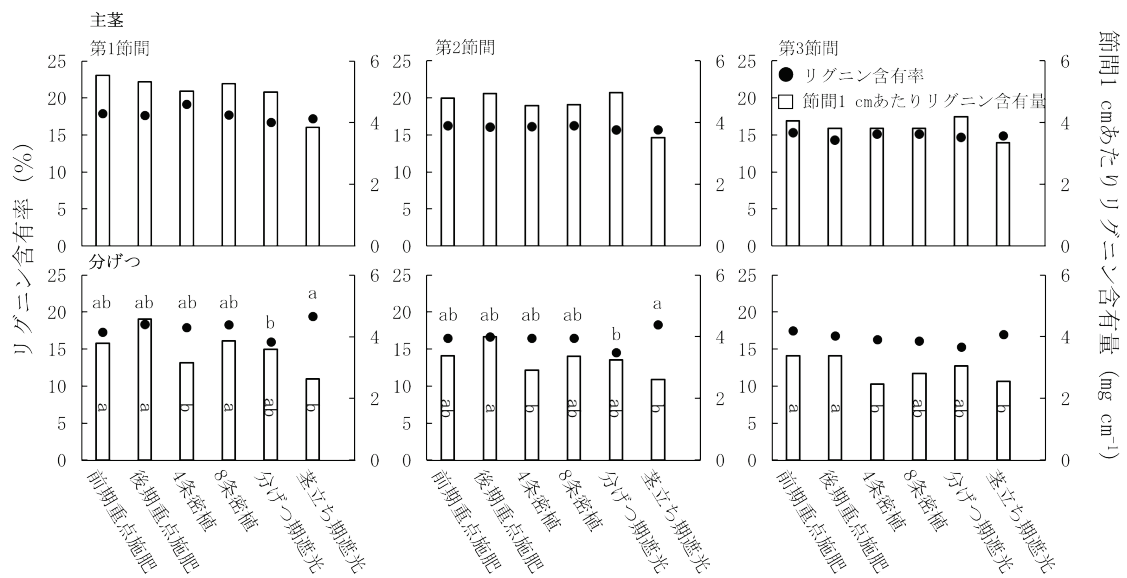
処理区	施肥時期	播種密度	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫指数 (%)	穂数 (m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数	千粒重 (g)	GPC (%)
前期重点施肥	前期重点施肥	200 粒 m <sup>-2</sup>	425	1293a	28.7b	544a	37.3	33.8	11.1
後期重点施肥	後期重点施肥	200 粒 m <sup>-2</sup>	448	1060b	36.9a	469b	32.8	38.9	12.7
4 条密植	後期重点施肥	400 粒 m <sup>-2</sup>	457	1171ab	34.1ab	514ab	32.0	38.9	13.0
8 条密植	後期重点施肥	400 粒 m <sup>-2</sup>	468	1169ab	35.0a	528ab	32.7	38.5	12.9

収量と千粒重は，子実を 2.2 mm の篩でふるい，含水率を 12.5% に補正した値を示す．異なる英小文字を付された値は，Tukey の多重比較において 5% 水準の有意差があることを示す．

第4-5 表 2016/17 年と 2017/18 年の 2 作期における遮光時期が稈長、節間長および節間 1 cm あたり乾物重におよぼす影響.

発生節位	遮光時期	稈長 (mm)	節間長 (mm)			節間 1 cm あたり乾物重 (mg cm <sup>-1</sup> )			
			第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 3 節間 より上位			第 3 節間 より上位
						第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	
2016/17 年									
主茎	無遮光	720	29.2b	58.2b	90.6b	551	17.4	18.0a	16.2a
	GS14～GS30	706	36.0a	57.6b	87.9b	533	15.6	17.5a	16.0a
	GS30～GS37	734	28.1b	76.6a	110.0a	560	16.7	14.3b	13.8b
2017/18 年									
主茎	無遮光	905a	37.9b	91.9b	143a	733a	30.2	30.8	26.7
	GS14～GS30	910a	46.7b	82.4c	115b	781a	29.3	31.3	28.5
	GS30～GS37	767b	58.0a	103.6a	119b	605b	22.3	22.5	22.6
主茎第 1 節 分げつ	無遮光	842a	42.4	96.2	178a	704a	25.8	24.6a	20.9
	GS14～GS30	852a	39.8	87.0	154ab	725a	23.5	23.5a	21.2
	GS30～GS37	680b	47.8	97.2	127b	535b	15.0	15.1b	16.5
主茎第 2 節 分げつ	無遮光	824a	34.0	89.1	170a	701a	24.3a	23.5	20.0
	GS14～GS30	854a	38.7	82.4	149a	733a	21.5a	21.5	18.8
	GS30～GS37	605b	36.5	80.5	117b	484b	11.9b	13.3	13.7

異なる英小文字を付された値は、Tukey の多重比較において 5%水準の有意差があることを示す．2017/18 年の無遮光区の値は、第 4-3 表に示した後期重点施肥区と同じ値を示している.



第 4-2 図 2017/18 年における窒素の施肥時期や播種密度，条数および遮光時期が開花 2 週間後の茎のリグニン含有率と節間 1 cm あたりリグニン含有量におよぼす影響．異なる英小文字を付された値は，Tukey の多重比較において 5%水準の有意差があることを示す．遮光時期は，分けつ期遮光区が GS14～GS30，茎立ち期遮光区が GS30～GS37 とした．

## 第5章 肥効調節型肥料を用いた省力型穂肥重点施肥の検討

### 緒言

第2章と第3章では、穂肥重点施肥は品種に関係なく穂数を増やすことによって収量を高め、窒素蓄積量が多くなることによって子実タンパク質含有率も高めることを明らかにした。しかし、これまでに検証した穂肥重点施肥法は、いずれも速効性肥料である尿素を用いた分施体系であり、追肥作業に時間や労力が必要となる。追肥作業にかかる時間と労力は、肥効調節型肥料を用いることにより省力化できるため（田中ら 2008）、肥効調節型肥料を用いて肥効を穂肥重点施肥と同様にできれば、パン用コムギの高品質多収に適した新たな施肥法となる可能性がある。

肥効調節型肥料の効果は、気象条件や土質によって異なる。肥効調節型肥料は、溶出速度や溶出量が土壌の種類に影響されることが報告されている（Nardiら 2018）。穂肥重点施肥は、黒ボク土で排水性が高く肥沃なコムギ多収地帯である熊本県菊池郡大津町と、排水の悪い灰色低地土の山口県山口市のいずれでも高品質多収となったが、肥効調節型肥料を用いて穂肥重点施肥を再現しようとした場合、分施体系による穂肥重点施肥と同じ効果があるかどうかは検証されていない。また、肥効調節型肥料の溶出速度は、気温や土壌水分量にも影響されるため（尾和・三井 1974, 藤澤ら 1998, Guertal 2009, 松谷・猪野 2017）、省力的かつ安定的に高品質多収を達成するためには、気象条件や中耕等の培土管理の影響を受けにくい省力型穂肥重点施肥法を明らかにする必要がある。

本章では、分施体系の穂肥重点施肥と同等の収量および子実タンパク質含有率を省力的に達成できる肥効調節型肥料の種類とその施用時期を明らかにするため、熊本県と山口県でそれぞれ4作期および2作期にわたって検証した。浦



野・保科（2012）は、肥効調節型肥料を基肥に用いたコムギ栽培では稈長が伸びて倒伏の危険性を高めることを報告しているため、本研究でも倒伏が生じた年次に稈長や節間長を詳細に調査し、倒伏を助長しない省力型穂肥重点施肥法についても検討した。

## 材料と方法

熊本県での試験は、2015/16年から2018/19年の4作期にわたり、パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」を対象に行った。圃場は、黒ボク土の水田転換畑で、土壌の理化学性は第2章に示した（第2-1表）。

播種は、2015/16年では12月1日、2016/17年では12月10日、2017/18年では12月4日、2018/19年では11月30日に行った。播種量は、いずれの作期も約  $7 \text{ g m}^{-2}$  とした。播種作業は、いずれの作期も条間約 35 cm の6条ドリル播きとした。熊本県の試験では、慣行的な栽培方法に従って麦踏みを行ったが、中耕と土入れは行わなかった。

処理区は、2015/16年では慣行分施肥区と穂肥重点施肥区、全量基肥 IB 区、全量穂肥 CDU 区、全量基肥 LPS30 区、全量基肥 LP30+LPS30 区を設けた。窒素の施肥時期と施肥量は、第5-1表に示した。施肥時期ごとの生育ステージは、分けつ肥が GS14（1月21日）、穂肥Ⅰが GS31（2月25日）、穂肥が GS32（3月8日）、穂肥Ⅱが GS37（4月2日）とした。慣行分施肥区と穂肥重点施肥区では、いずれの作期も尿素を土壌表面に施用した。肥効調節型肥料を用いた処理区では、窒素施肥量を増やすことによって子実タンパク質含有率を向上させられる可能性が示唆されているため（村田ら 2017）、総窒素施肥量を慣行分施肥区や穂肥重点施肥区に比べて多くした。全量基肥 IB 区は、グッド IB（イソブチルアルデヒド縮合尿素、ジェイカムアグリ株式会社）を条間に施用し、三角ホーで土壌と混和

させた。全量穂肥 CDU 区は、ハイパーCDU 細粒（アセトアルデヒド縮合尿素，ジェイカムアグリ株式会社）を条間に施用し，同様に土壌と混和させた。全量基肥 LPS30 区は，LP コート S30（シグモイド型 30 日溶出被覆尿素，ジェイカムアグリ株式会社）を条間に施用し，土壌と混和させた。全量基肥 LP30+LPS30 区は，LP コート 30（リニア型 30 日溶出タイプ被覆尿素，ジェイカムアグリ株式会社）と LP コート S30 を 2：1 の割合で混ぜて条間に施用し，土壌と混和させた。リンとカリは，苦土重焼燐（ $P_2O_5$ ：35%）と塩化カリ（ $K_2O$ ：60%）を用い，播種直前にリン成分とカリ成分でそれぞれ  $8.0 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。

2016/17 年では，慣行分施肥区と穂肥重点施肥区，穂肥尿素+CDU 区，全量基肥 IB 区，全量分けつ肥 CDU 区，全量基肥 LP30 区を設けた。施肥時期ごとの生育ステージは，分けつ肥が GS14（1 月 26 日），穂肥Ⅰが GS30（2 月 22 日），穂肥が GS31（3 月 4 日），穂肥Ⅱが GS37（4 月 3 日）とした。穂肥尿素+CDU 区は，基肥と分けつ肥を施用せず，GS30 に窒素成分で尿素とハイパーCDU 細粒をそれぞれ  $5 \text{ g m}^{-2}$  ずつ土壌表面に施用した。全量基肥 IB 区は，グッド IB を条間に施用し，土壌と混和させた。全量分けつ肥 CDU 区は，ハイパーCDU 細粒を土壌表面に施用した。全量基肥 LP30 区は，LP コート 30 を条間に施用し，土壌と混和させた。リンとカリは，これ以降の年次ではいずれも PK 化成 40 号（ $P_2O_5$ ：20%， $K_2O$ ：20%）を用い，播種直前に成分でそれぞれ  $10 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した。

2017/18 年でも慣行分施肥区と穂肥重点施肥区，穂肥尿素+CDU 区，全量基肥 IB 区，全量分けつ肥 CDU 区，全量基肥 LP30 区を設けた。施肥時期ごとの生育ステージは，分けつ肥が GS14（1 月 29 日），穂肥Ⅰが GS30（3 月 1 日），穂肥が GS31（3 月 15 日），穂肥Ⅱが GS39（4 月 6 日）とした。肥効調節型肥料の施用方法は，いずれも 2016/17 年と同様とした。

2018/19 年では慣行分施肥区と穂肥重点施肥区，穂肥尿素+CDU 区，全量穂肥

CDU 区，全量基肥 LP30 区を設けた．施肥時期ごとの生育ステージは，分けつ肥が GS14（1 月 22 日），穂肥Ⅰが GS30（2 月 12 日），穂肥が GS32（3 月 8 日），穂肥Ⅱが GS41（3 月 26 日）とした．全量穂肥 CDU 区は，ハイパーCDU を土壌表面に施用した．

処理区の配置は，2015/16 年と 2016/17 年では 4 反復の乱塊法，2017/18 年では 6 反復の乱塊法，2018/19 年では 5 反復の乱塊法とした．2016/17 年では，最も東側に設置した反復で枯れ熟れ様登熟不良が発生したため，4 反復のうち 3 反復を解析した．

山口県の試験では，肥効調節型肥料を用いた施肥体系で分施の穂肥重点施肥と同水準の収量が得られるかどうか，および播種量を増やすことによって総窒素施肥量が削減できるかどうかを検証した．試験は 2017/18 年と 2018/19 年にパン用コムギ品種「せときらら」を対象に行った．圃場は灰色低地土の水田転換畑で，土壌の理化学性は第 3 章に示した（第 3-1 表）．

播種は，2017/18 年では 11 月 7 日，2018/19 年では 11 月 12 日に行った．播種作業は，いずれの作期も 1.5 m 幅の畝たて様式とし，条間約 30 cm の 4 条ドリル播きとした．山口県の試験では，麦踏みや中耕，土入れといった作業は行わなかった．

2017/18 年の処理区は，慣行分施肥区，穂肥重点施肥区，穂肥尿素+CDU 区，全量基肥 LP30-13N 区，全量基肥 LP30-10N 区および全量基肥 LP30-10N（無）区を設けた．播種量と窒素施肥量は，第 5-2 表に示した．山口県の試験でも慣行分施肥区と穂肥重点施肥区は，いずれの作期も尿素を土壌表面に施用した．全量基肥 LP30-13N 区では，播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  で基肥に尿素と LP30 をそれぞれ  $3 \text{ g m}^{-2}$  および  $10 \text{ g m}^{-2}$  ずつ播種直後に施用した．それらの肥料は条間に散布し，三角ホーで土壌と混和した．これに対し，全量基肥 LP30-10N 区は，播種量を  $9 \text{ g m}^{-2}$  とし，

LP30 のみを  $10 \text{ g m}^{-2}$  条間の土壌に混和した．穂肥尿素+CDU 区は基肥窒素を施用せず，尿素で分けつ肥を施用し，穂肥 I として尿素とハイパーCDU をそれぞれ  $6 \text{ g m}^{-2}$  および  $2 \text{ g m}^{-2}$  ずつ土壌表面に施用した．いずれの処理区も開花期に窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう尿素を施用したが，一部の処理区内には開花期追肥を施用しない区も設けた（第 5-2 表）．施肥時期ごとの生育ステージは，分けつ肥が GS15（1 月 16 日），穂肥 I が GS30（2 月 14 日），穂肥が GS32（2 月 27 日），穂肥 II が GS37（3 月 30 日）とした．

2018/19 年では，慣行分施肥区と穂肥重点施肥区，穂肥尿素+LPS30 区，全量基肥 LPS30 区，全量基肥 LPS40 区を設けた．全量基肥 LPS30 区と全量基肥 LPS40 区は，それぞれ LP コート S30 または LP コート S40 を全量基肥として条間に施用し，土壌と混和した．これらの処理区では，播種量を  $9 \text{ g m}^{-2}$  と増やし，基肥窒素施肥量（出穂前総窒素施肥量）を  $8 \text{ g m}^{-2}$  と穂肥重点施肥区に比べて減らした．また，2017/18 年と同様にいずれの処理区も窒素成分で  $6 \text{ g m}^{-2}$  の開花期追肥を施用したが，開花期追肥を施用しない全量基肥 LPS30（無）区と全量基肥 LPS40（無）区も設けた．穂肥尿素+LPS30 区は基肥を施用せず，分けつ肥を尿素で施用し，穂肥 I として尿素を  $5 \text{ g m}^{-2}$  と LP コート S30 を  $4 \text{ g m}^{-2}$  土壌表面に施用した．施肥時期ごとの生育ステージは，分けつ肥が GS14（1 月 17 日），穂肥 I が GS30（2 月 8 日），穂肥が GS31（2 月 27 日），穂肥 II が GS37（3 月 15 日）とした．処理区の配置は，2017/18 年と 2018/19 年のいずれも 4 反復の乱塊法とした．

収量調査は，熊本県の試験では 2016 年 5 月 30 日，2017 年 6 月 3 日，2018 年 6 月 3 日，2019 年 5 月 30 日に行った．山口県の試験では，2018 年 5 月 30 日と 2019 年 5 月 31 日に行った．調査内容は，収量と収量構成要素，子実タンパク質含有率とした．収量と収量構成要素，子実タンパク質含有率の調査方法は，

いずれも第 2 章と同様とした。熊本県における 2015/16 年の試験では、対照区として第 2 章で示した慣行分施肥区および穂肥重点施肥区の収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率の値を用いた（第 2-3 表）。

地上部窒素蓄積量は、熊本県の 2018/19 年作期における試験では穂揃い期と成熟期に調査し、他の作期ではいずれの試験地でも成熟期に調査した。成熟期における地上部窒素蓄積量の測定方法は、第 3 章と同様とした。

倒伏の調査は、倒伏が生じた 2018/19 年の熊本県における試験で行った。調査対象は、茎立ち開始期以前に窒素を施用した慣行分施肥区と全量基肥 LP30 区、施用しなかった穂肥重点施肥区と全量穂肥 CDU 区とした。穂肥尿素+CDU 区は、茎立ち開始期以前の窒素施用が穂肥重点施肥区および全量穂肥 CDU 区と同様であったため調査を省略した。倒伏に関係する形質である稈長と節間長（Pinthus 1973）、節間 1 cm あたり乾物重（Zhang ら 2016）は、黄熟期（2019 年 5 月 17 日）に調査した。調査方法は、第 4 章と同様とした。倒伏程度は、作物調査基準の成長解析法（広田 2013）に従い調査した。

気象データは、熊本地方気象台および山口地方気象台の各栽培期間における値と平年値（1981 年～2010 年の平均値）を使用した。

統計処理は、いずれの年次でも分散分析を行った後、Tukey の多重比較を行った。

## 結果

第 5-3 表には、熊本県大津町の 2015/16 年から 2018/19 年までの 4 作期における主要な生育ステージごとの平均気温と積算降水量、積算日照時間を示した。2015/16 年は、平年値に比べて播種直後（GS00）から茎立ち開始期（GS30）の平均気温が 0.9℃高く、積算降水量が 33%多く、積算日照時間が 17%短かった。

GS30 から穂揃い期 (GS55) では、平均気温が 1.5℃高く、積算降水量が 55%少なく、積算日照時間が 12%長かった。GS55 から成熟期 (GS92) では、平均気温が 1.2℃高く、積算降水量が 41%多く、積算日照時間は平年並みであった。2016/17 年は、平年値に比べて GS00 から GS30 の平均気温が 0.6℃高く、積算降水量が 49%多く、積算日照時間が 10%長かった。GS30 から GS55 では、平均気温、積算降水量、日照時間のいずれも平年並みで、GS55 から GS92 では比較的天候がよく積算日照時間が 34%長かった。2017/18 年は、GS00 から GS30 の積算降水量が 31%少なかったが、平均気温が 1.7℃低かった。GS30 から GS55 では、一転して平均気温が 2.0℃高くなり積算日照時間も 18%長かった。GS55 から GS92 では、積算降水量が 33%多かったが、気温も高く日照時間も長かった。2018/19 年は、GS00 から GS30 の平均気温が平年値に比べて 1.8℃高く、積算降水量は平年並みであったが、積算日照時間が 12%短かった。GS30 から GS55 では、気温と積算降水量が平年並みであったが、積算日照時間が 24%長かった。GS55 から GS92 では平均気温が高く、積算降水量が 51%少なく、積算日照時間が 18%長かった。

第 5-4 表には、山口県山口市の 2017/18 年と 2018/19 年における主要な生育ステージごとの平均気温と積算降水量、積算日照時間を示した。2017/18 年は、熊本県と同様に、GS30 過ぎまでは低温傾向であったが、その後降水量はやや多いものの気温が高く日照時間も長かった。2018/19 年も、熊本県と同様に暖冬であり、GS50 以降の降水量が記録的に少なかった。

第 5-5 表には、2015/16 年から 2018/19 年の 4 作期に熊本県で栽培した「ミナミノカオリ」の収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC) を示した。収量は 4 作期とも処理による差はなかった。全乾物重も 2015/16 年と 2016/17 年、2018/19 年では処理による有意な差はなかった。2017/18 年では、全量分げつ肥 CDU 区が 1241 g m<sup>-2</sup> と穂肥重点施肥区の 1449 g m<sup>-2</sup> に比べて有意

に軽かったが、その他の処理区はいずれも約  $1300 \text{ g m}^{-2}$  であった。収穫指数は、2015/16 年と 2016/17 年、2017/18 年では処理による差はなかった。2018/19 年では、全量基肥 LP30 区が 35.6%と穂肥重点施肥区、穂肥尿素+CDU 区および全量穂肥 CDU 区に比べて有意に低かった。

穂数は、2015/16 年と 2016/17 年、2017/18 年では処理による有意な差がなかった。2018/19 年では、慣行分施肥区と全量基肥 LP30 区がそれぞれ  $452 \text{ 本 m}^{-2}$  および  $457 \text{ 本 m}^{-2}$  と、穂肥尿素+CDU 区と全量穂肥 CDU 区の  $510 \text{ 本 m}^{-2}$  および  $558 \text{ 本 m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった。一穂粒数は、4 作期とも処理による有意な差はなかった。千粒重も 4 作期とも処理による有意な差はなかった。

GPC は、2015/16 年では穂肥重点施肥区と全量基肥 LP30+LPS30 区がそれぞれ 13.8%および 13.9%と、慣行分施肥区の 12.5%に比べて有意に高かった。2016/17 年では、有意な差はないものの全量基肥 IB 区と全量分けつ肥 CDU 区がそれぞれ 10.2%および 10.5%と他の処理区に比べて低くなる傾向があった。2017/18 年と 2018/19 年では、処理による有意な差はなかった。

第 5-6 表に 2017/18 年と 2018/19 年に山口県山口市で栽培した「せときらら」の収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率（GPC）を示した。2017/18 年の収量は、慣行分施肥区と穂肥尿素+CDU 区、全量基肥 LP30-N13 区では穂肥重点施肥区と同程度であったが、全量基肥 LP30-10N 区と全量基肥 LP30-10N（無）区は播種量を増量したものの、穂肥重点施肥区に比べて約 14%低くなる傾向があった。2018/19 年では、肥効調節型肥料を用いた処理区がいずれも穂肥重点施肥区の  $723 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に低かった。

2017/18 年の全乾物重は、慣行分施肥区と穂肥重点施肥区、穂肥尿素+CDU 区でいずれも約  $1200 \text{ g m}^{-2}$  であったが、全量基肥 LP30-13N 区と全量基肥 LP30-10N 区では、それぞれ  $1071 \text{ g m}^{-2}$  および  $1089 \text{ g m}^{-2}$  と穂肥重点施肥区に比べて 11%

軽くなる傾向があった。全量基肥 LP30-10N（無）区は、 $1037 \text{ g m}^{-2}$ と穂肥重点施肥区および穂肥尿素+CDU 区に比べて有意に軽かった。2018/19 年では、慣行分施肥区と穂肥重点施肥区、穂肥尿素+LPS30 区のいずれも同程度であった。肥効調節型肥料を基肥に施用した処理区は、いずれも慣行分施肥区に比べて有意に軽かった。収穫指数は、2017/18 年では 40.4～43.9%で有意な差はなかった。2018/19 年では、穂肥重点施肥区が 45.8%と他の処理区に比べて有意に高かった。

穂数は、いずれの作期も処理による有意な差はなかった。一穂粒数は、2017/18 年の穂肥尿素+CDU 区では 40.8 粒と穂肥重点施肥区や全量基肥 LP30-13N 区と有意な差はなかったが、慣行分施肥区および全量基肥 LP30-10N（無）区に比べて有意に多かった。2018/19 年では、穂肥重点施肥区が 47.1 粒と他の処理区より有意に多かった。千粒重は、2017/18 年では全量基肥 LP30-13N 区が慣行分施肥区に比べて有意に重かった。2018/19 年では、穂肥尿素+LPS30 区と全量基肥 LPS40 区が約 45 g で、慣行分施肥区の 42.5 g に比べて有意に重かった。その他の処理区はいずれも約 44 g であった。

GPC は、2017/18 年では穂肥重点施肥区と全量基肥 LP30-13N 区、全量基肥 LP30-10N 区がいずれも 12.0%以上と、慣行分施肥区や穂肥尿素+CDU 区、全量基肥 LP30-10N（無）区に比べて有意に高かった。全量基肥 LP30-10N（無）区は 9.5%と、全量基肥 LP30-10N 区に比べて 2.5 ポイント有意に低かった。2018/19 年では、全量基肥 LPS40 区が 11.2%と慣行分施肥区および穂肥尿素+LPS30 区の 10.2%に比べて有意に高かった。全量基肥 LPS30（無）区と LPS40（無）区は、全量基肥 LPS30 区や全量基肥 LPS40 区に比べておよそ 2.0 ポイント有意に低かった。

第 5-1 図には、2016/17 年から 2018/19 年の 3 作期に熊本県で栽培した「ミナミノカオリ」の穂揃い期および成熟期における地上部窒素蓄積量を示した。2016/17 年では、成熟期の地上部窒素蓄積量は処理区間で有意な差はなかった。



その中で、穂肥尿素+CDU 区と全量基肥 LP30 区は、穂肥重点施肥区と同程度であった。一方、全量基肥 IB 区と全量分けつ肥 CDU 区は、それぞれ  $13.4 \text{ g m}^{-2}$  および  $14.7 \text{ g m}^{-2}$  といずれも穂肥重点施肥区に比べて少ない傾向があった。2017/18 年では、穂肥重点施肥区が  $12.1 \text{ g m}^{-2}$  と最も多く、次いで穂肥尿素+CDU 区の  $11.0 \text{ g m}^{-2}$ 、全量基肥 LP30 区の  $10.7 \text{ g m}^{-2}$  の順に多かった。全量分けつ肥 CDU 区は、 $9.1 \text{ g m}^{-2}$  と穂肥重点施肥区に比べて有意に少なかった。2018/19 年では、穂揃い期の地上部窒素蓄積量は穂肥重点施肥区で  $8.2 \text{ g m}^{-2}$  と慣行分施肥区の  $5.2 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に多かった。穂肥尿素+CDU 区と全量穂肥 CDU 区、全量基肥 LP30 区では、いずれも約  $7 \text{ g m}^{-2}$  と穂肥重点施肥区に比べて少なく、慣行分施肥区に比べて多い傾向があった。成熟期の地上部窒素蓄積量は処理による有意な差はなく、同程度であった。

第 5-2 図は、2017/18 年と 2018/19 年に山口県山口市で栽培した「せときらら」の成熟期における地上部窒素蓄積量を示す。2017/18 年の成熟期における地上部窒素蓄積量は、穂肥重点施肥区で  $14.8 \text{ g m}^{-2}$  と慣行分施肥区の  $11.2 \text{ g m}^{-2}$ （総窒素施肥量はいずれも  $19 \text{ g m}^{-2}$ ）に比べて有意に多かった。穂肥尿素+CDU 区（総窒素施肥量  $17 \text{ g m}^{-2}$ ）は慣行分施肥区に比べて有意に多かったが、穂肥重点施肥区に比べて  $1.6 \text{ g m}^{-2}$  少ない傾向があった。全量基肥 LP30-13N 区（総窒素施肥量  $19 \text{ g m}^{-2}$ ）と全量基肥 LP30-10N 区（総窒素施肥量  $16 \text{ g m}^{-2}$ ）はいずれも  $12.8 \text{ g m}^{-2}$  と、穂肥重点施肥区に比べて有意に少なかった。全量基肥 LP30-10N（無）区は、 $9.1 \text{ g m}^{-2}$  と全量基肥 LP30-10N 区に比べて  $3.7 \text{ g m}^{-2}$  少なかった。

2018/19 年でも、成熟期の地上部窒素蓄積量は穂肥重点施肥区で  $14.0 \text{ g m}^{-2}$  と最も多かった。穂肥尿素+LPS30 区の地上部窒素蓄積量は  $12.0 \text{ g m}^{-2}$  と、慣行分施肥区や穂肥重点施肥区に比べてやや少なかった（いずれも総窒素施肥量  $17 \text{ g m}^{-2}$ ）。全量基肥 LPS30 区と全量基肥 LPS40 区（総窒素施肥量  $14 \text{ g m}^{-2}$ ）は、それ

ぞれ  $11.7 \text{ g m}^{-2}$  および  $11.1 \text{ g m}^{-2}$  といずれも穂肥重点施肥区に比べて有意に少なかった。全量基肥 LPS30（無）区と全量基肥 LPS40（無）区はそれぞれ  $9.5 \text{ g m}^{-2}$  および  $9.7 \text{ g m}^{-2}$  と、開花期を施用した処理区に比べてそれぞれ  $2.2 \text{ g m}^{-2}$  および  $1.4 \text{ g m}^{-2}$  少なかった。

第 5-7 表には、2018/19 年に熊本県大津町で栽培した「ミナミノカオリ」の黄熟期（5 月 17 日，GS81～83）における倒伏程度と稈長，節間長および節間 1 cm あたり乾物重を示した。倒伏程度は，全量穂肥 CDU 区では 0.0 と慣行分施肥区や全量基肥 LP30 区の 2.6 および 2.3 に比べて低くなる傾向があった。全量穂肥 CDU 区は，主茎と分げつの稈長がいずれも慣行分施肥区に比べて短くなる傾向があった。全量穂肥 CDU 区の節間長は，主茎と分げつのいずれも第 3 節間以外で慣行分施肥区や穂肥重点施肥区に比べて短かった。第 3 節間長は，主茎と分げつのいずれも慣行分施肥区と同程度で，穂肥重点施肥区に比べて有意に短かった。節間 1 cm あたり乾物重では，全量穂肥 CDU 区は慣行分施肥区に比べて主茎の第 3 節間と主茎第 1 節分げつの第 2 節間および第 3 節間で有意に軽かったが，その他の節間では同程度であった。全量基肥 LP30 区の稈長は，主茎と分げつのいずれも慣行分施肥区と同程度かやや長い傾向があった。節間長は，主茎の第 2 節間では慣行分施肥区と比べて有意に短かったが，その他の節間では慣行分施肥区と同程度かむしろ長くなる傾向があった。節間 1 cm あたり乾物重は，全量穂肥 CDU 区と同様であった。第 6 節間まで伸長した稈の割合は，穂肥重点施肥区が 11% と最も低く，全量基肥 LP30 区と慣行分施肥区でそれぞれ 37% および 29% と高かった（データ省略）。

## 考察

本章では、2015/16 年から 2018/19 年の 4 作期および 2017/18 年と 2018/19

年の2作期において、それぞれパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」と「せときらら」で肥効調節型肥料を用いることにより、省力的に分施肥系の穂肥重点施肥と同等の収量および子実タンパク質含有率を達成できるか検証した。また、肥効調節型肥料を用いた穂肥重点施肥は、分施肥系の穂肥重点施肥と同様に倒伏の危険性を抑えられるかも検証した。

LP コート 30 の全量基肥施用やハイパーCDU を用いた穂肥重点施肥は、「ミナミノカオリ」で省力的に多収・高子実タンパク質含有率を達成するために有効な栽培方法であると考えられた。本章では、第2章と第3章のように茎立ち期以降に窒素を重点的に効かせる穂肥重点施肥を省力的に再現するために肥効調節型肥料を用いたが、熊本県の圃場（黒ボク土）では、いずれの肥効調節型肥料を用いても穂肥重点施肥区と同等の収量となった（第5-5表）。子実タンパク質含有率は、2016/17年の全量基肥IB区と全量分けつ肥CDU区では穂肥重点施肥区に比べて低くなる傾向があったが（第5-5表）、その他の作期では肥効調節型肥料の種類や施用時期に関係なく穂肥重点施肥区と同程度であった（第5-5表）。成熟期の地上部窒素蓄積量がいずれの作期でも穂肥重点施肥区と同程度となった処理区は、穂肥尿素+CDU区と全量基肥LP30区であった（第5-1図）。

「せときらら」では、2017/18年の穂肥尿素+CDU区と全量基肥LP30-13N区が「ミナミノカオリ」の場合と同様に穂肥重点施肥区と同等の収量となった（第5-6表）。一方で、穂肥尿素+CDU区は、穂肥重点施肥区に比べて出穂前総窒素施肥量が少なかったため成熟期の地上部窒素蓄積量がやや少なく（第5-2表、第5-2図）、子実タンパク質含有率が低かった（第5-6表）。全量基肥LP30-13区も成熟期の地上部窒素蓄積量が穂肥重点施肥区に比べて有意に少なく（第5-2図）、窒素の吸収効率が高いといわれる肥効調節型肥料（農林水産省 2020d）を使う場合でも、速効性肥料を用いる場合と同量かそれ以上の窒素施肥が必要である

と考えられた。

「せときらら」では、肥効調節型肥料を基肥に用いた場合でも分施体系と同様に開花期の窒素追肥が必要であると考えられた。子実タンパク質含有率を高めるために有効な開花期前後の窒素追肥は（高山ら 2004, 岩渕ら 2007, 島崎ら 2014, 石丸ら 2015), 肥効調節型肥料を用いることによって省略できる可能性が示唆されているが（中司ら 2010), 本研究で肥効調節型肥料のみを施用し、開花期追肥を施用しなかった（無）区では（第 5-2 表), 子実タンパク質含有率が 1.7~2.5 ポイント低かった（第 5-6 表)。「せときらら」は、子実タンパク質含有率が従来の西南暖地向けパン用コムギ品種に比べて低くなりやすいため（高田ら 2017), 肥効調節型肥料を用いた場合でも子実タンパク質含有率が低下しないよう配慮が必要であると考えられた。

「せときらら」では、播種量を増やしても肥効調節型肥料の総窒素施肥量を減らすことはできなかった。肥効調節型肥料は、窒素 1 kg あたり単価が速効性肥料である尿素や硫酸に比べて高いため、実用性を考えれば施用量を極力減らす必要がある。本研究では、播種量を増やすことによって収量におよぼす影響の大きい穂数（稲村ら 2007) を確保しやすくすれば、肥効調節型肥料の施用量を減らせると考えて播種量を増やした処理区を設けたが（第 5-2 表), いずれの作期も一穂粒数が少なかったため収量は低かった（第 5-6 表)。窒素施肥量を減らした処理区では、成熟期の地上部窒素蓄積量も穂肥重点施肥区に比べて少なかったことから（第 5-2 図), 肥効調節型肥料を用いた穂肥重点施肥でも十分な量の窒素を投入する必要があると考えられた。

茎立ち期に肥効調節型肥料を追肥する施肥体系は、倒伏の危険性を低下させた。倒伏の危険性は、茎立ち期中の窒素追肥によって高まるとされているが（倉井ら 1998, 土谷 2012), 本研究の第 4 章では、茎立ち期中の窒素追肥量を多く

しても茎立ち期前の生育量を抑えることによって倒伏の危険性を軽減できることを明らかにした。本章では、熊本県の試験の「ミナミノカオリ」の2018/19年でのみ倒伏が発生した。2018/19年で倒伏が発生した原因は、播種から茎立ち開始期までの気温が高く（第5-3表）、他の作期よりも過繁茂な群落になりやすかった（Pinthus 1973）ためであると考えられた。しかし、全量穂肥CDU区は、茎立ち開始期まで窒素を施用していないため、GS30のコムギによる土壌表面の被覆率が慣行分施肥区や全量基肥LP30区に比べて約30%も低く（データ省略）、茎立ち期前の生育量が抑えられていたため、分げつの稈長および節間長が慣行分施肥区や全量基肥LP30区に比べて短く、倒伏程度が低かった（第5-7表）。穂肥尿素+CDU区も茎立ち開始期以前に窒素を施用していなかったため、黄熟期の倒伏程度が0.0と低かった（データ省略）。肥効調節型肥料を基肥に全量施用する施肥体系では、茎立ち期前に過繁茂な群落となりやすいため、倒伏を防ぐためには茎立ち開始期に肥効調節型肥料や尿素を施用する栽培体系が適していると考えられた。

## 摘要

穂肥重点施肥はパン用コムギの高品質多収栽培に適しているが、速効性肥料を用いた分施体系のため、追肥作業に時間や労力がかかることが課題となっている。本研究では、省力的に穂肥重点施肥の肥効を再現できる肥効調節型肥料の種類や施用時期を明らかにするため、熊本県と山口県でそれぞれ4作期および2作期にわたって検証した。熊本県で栽培した「ミナミノカオリ」の収量は、肥効調節型肥料の種類に関係なくいずれの作期も穂肥重点施肥区と同程度であった。子実タンパク質含有率は、2016/17年の全量基肥IB区と全量穂肥CDU区では低くなる傾向があったが、その他の作期ではいずれの肥効調節型肥料を用いても穂肥重点施肥区と同程度であった。成熟期の地上部窒素蓄積量は、いずれの作期でも茎立ち開始期に尿素とCDUを施用した穂肥尿素+CDU区と全量基肥LP30区が穂肥重点施肥区と同程度まで高まった。山口県で栽培した「せときらら」では、2017/18年の穂肥尿素+CDU区が穂肥重点施肥区と同等の収量および成熟期地上部窒素蓄積量となった。倒伏は2018/19年の熊本県における試験でのみ発生し、黄熟期の倒伏程度は全量穂肥CDU区が0.0と慣行分施区や全量基肥LP30区の2.6および2.3に比べて低かった。全量穂肥CDU区で倒伏程度が低かった原因は、慣行分施区や全量基肥LP30区に比べて稈長が16~76 mm短く、稈基部の節間長が8.4~23.6 mm短くなったためであった。茎立ち開始期に肥効調節型肥料および尿素を施用する全量穂肥施肥体系は、省力的なパン用コムギの高品質多収栽培に適した栽培方法であると考えられた。

第 5-1 表 熊本県での試験における処理区ごとの窒素施肥時期と施肥量 ( $\text{g m}^{-2}$ ).

処理区	総窒素 施肥量	施肥時期				
		基肥	分げつ肥	穂肥Ⅰ	穂肥	穂肥Ⅱ
2015/16 年						
慣行分施	10	4	3	—	3	—
穂肥重点施肥	10	—	—	5	—	5
全量基肥 IB	16	16	—	—	—	—
全量穂肥 CDU	16	—	—	16	—	—
全量基肥 LPS30	16	16	—	—	—	—
全量基肥 LP30+LPS30	16	16	—	—	—	—
2016/17 年						
慣行分施	10	4	3	—	3	—
穂肥重点施肥	10	—	—	5	—	5
穂肥尿素+CDU	10	—	—	10	—	—
全量基肥 IB	10	10	—	—	—	—
全量分げつ肥 CDU	10	—	10	—	—	—
全量基肥 LP30	10	10	—	—	—	—
2017/18 年						
慣行分施	10	5	2	—	3	—
穂肥重点施肥	10	—	—	5	—	5
穂肥尿素+CDU	10	—	—	10	—	—
全量基肥 IB	10	10	—	—	—	—
全量分げつ肥 CDU	10	—	10	—	—	—
全量基肥 LP30	10	10	—	—	—	—
2018/19 年						
慣行分施	10	5	2	—	3	—
穂肥重点施肥	10	—	—	5	—	5
穂肥尿素+CDU	10	—	—	10	—	—
全量穂肥 CDU	10	—	—	10	—	—
全量基肥 LP30	10	10	—	—	—	—

分げつ肥, 穂肥 I, 穂肥, 穂肥 II はそれぞれ GS14, GS30, GS31, GS39 (Zadoks ら 1974) を目安に施肥した. 穂肥尿素+CDU 区は, 穂肥 I として尿素とハイパーCDU をそれぞれ  $5 \text{ g m}^{-2}$  ずつ施用した

第 5-2 表 山口県での試験における処理区ごとの播種量と窒素施肥時期，施肥量 ( $\text{g m}^{-2}$ ).

処理区	播種量 (g m <sup>-2</sup> )	総窒素 施肥量	施肥時期					開花期
			基肥	分けつ肥	穂肥Ⅰ	穂肥	穂肥Ⅱ	
2017/18 年								
慣行分施	6	19	6	3	—	4	—	6
穂肥重点施肥	6	19	—	3	6	—	4	6
穂肥尿素+CDU	6	17	—	3	8	—	—	6
全量基肥 LP30-13N	6	19	13	—	—	—	—	6
全量基肥 LP30-10N	9	16	10	—	—	—	—	6
全量基肥 LP30-10N（無）	9	10	10	—	—	—	—	—
2018/19 年								
慣行分施	6	17	5	3	—	3	—	6
穂肥重点施肥	6	17	—	—	6	—	5	6
穂肥尿素+LPS30	6	17	—	2	9	—	—	6
全量基肥 LPS30	9	14	8	—	—	—	—	6
全量基肥 LPS30（無）	9	8	8	—	—	—	—	—
全量基肥 LPS40	9	14	8	—	—	—	—	6
全量基肥 LPS40（無）	9	8	8	—	—	—	—	—

分けつ肥，穂肥 I，穂肥，穂肥 II はそれぞれ GS14，GS30，GS31，GS37 (Zadoks ら 1974) を目安に施肥した．穂肥尿素+CDU 区は穂肥 I として尿素とハイパーCDU でそれぞれ  $6 \text{ g m}^{-2}$  および  $2 \text{ g m}^{-2}$  施用した．穂肥尿素+LPS30 区は，穂肥 I として尿素で  $5 \text{ g m}^{-2}$  と LP コート S30 で  $4 \text{ g m}^{-2}$  施用した．



第 5-3 表 熊本県大津町の 2015/16 年から 2018/19 年の 4 作期における主要な生育ステージごとの平均気温と積算降水量，積算日照時間.

作期	生育ステージ	平均気温 (℃)		積算降水量 (mm)		積算日照時間 (時間)	
2015/16 年	GS00～GS30	6.2	(+0.9)	236	(+58)	331	(-66)
	GS30～GS55	11.7	(+1.5)	94	(-117)	289	(+30)
	GS55～GS92	19.1	(+1.2)	363	(+106)	278	(+6)
2016/17 年	GS00～GS30	5.6	(+0.6)	231	(+76)	385	(+34)
	GS30～GS55	9.9	(-0.2)	194	(-17)	260	(+1)
	GS55～GS92	19.2	(+0.9)	201	(-87)	402	(+102)
2017/18 年	GS00～GS30	3.8	(-1.7)	130	(-59)	398	(-14)
	GS30～GS55	12.6	(+2.0)	209	(+9)	289	(+44)
	GS55～GS92	19.2	(+1.0)	383	(+96)	354	(+53)
2018/19 年	GS00～GS30	7.0	(+1.8)	139	(-7)	308	(-41)
	GS30～GS55	9.7	(+0.5)	216	(-6)	347	(+68)
	GS55～GS92	18.5	(+1.0)	137	(-142)	355	(+55)

GS は，Zadoks ら（1974）の生育ステージを示し，GS00 が播種直後，GS30 が茎立ち開始期，GS55 が穂揃い期，GS92 が成熟期を示す．括弧内の数値は，平年値との差を示す．

第 5-4 表 山口県山口市の 2017/18 年と 2018/19 年における主要な生育ステージごとの平均気温と積算降水量，積算日照時間.

作期	生育ステージ	平均気温 (℃)		積算降水量 (mm)		積算日照時間 (時間)	
2017/18 年	GS00～GS30	5.4	(-1.3)	150	(-70)	383	(-13)
	GS30～GS55	9.2	(+1.5)	286	(+28)	369	(+96)
	GS55～GS92	17.9	(+1.7)	331	(+18)	319	(+10)
2018/19 年	GS00～GS30	7.4	(+1.0)	162	(-33)	348	(-1)
	GS30～GS55	8.5	(+1.3)	218	(-25)	294	(+27)
	GS55～GS92	18.1	(+2.0)	218	(-151)	448	(+72)

括弧内の数値は，平年値との差を示す.

第 5-5 表 2015/16 年から 2018/19 年の 4 作期に熊本県大津町で栽培した「ミナミノカオリ」の収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC)。

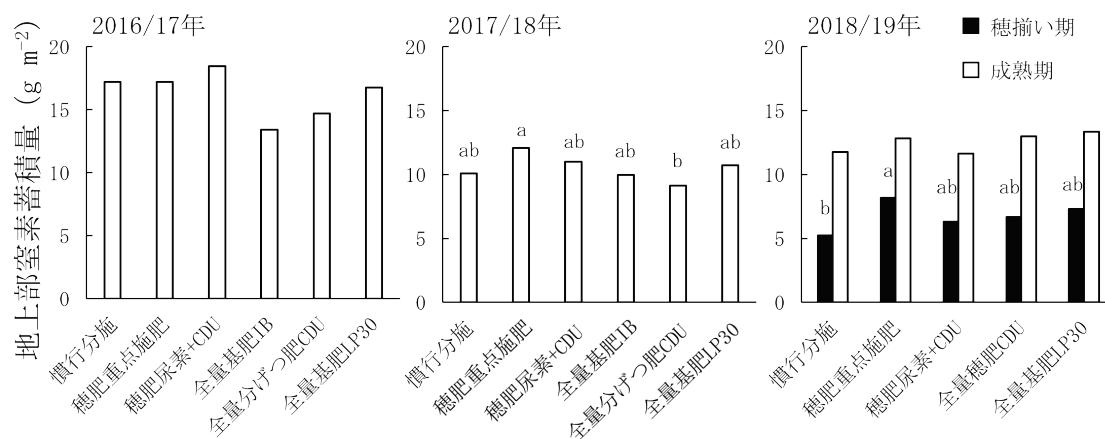
処理区	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)
2015/16 年							
慣行分施	582	1278	39.9	531	36.7	35.6	12.5a
穂肥重点施肥	607	1312	40.5	557	35.3	35.7	13.8b
全量基肥 IB	577	1283	39.4	555	35.0	36.2	12.9ab
全量穂肥 CDU	593	1208	43.0	537	36.0	35.0	13.7ab
全量基肥 LPS30	556	1231	39.5	535	36.1	34.4	13.5ab
全量基肥 LP30+LPS30	567	1293	38.2	547	34.8	34.1	13.9b
2016/17 年							
慣行分施	697	1433	40.9	539	33.6	38.4	13.6
穂肥重点施肥	700	1389	42.3	553	37.1	37.2	13.5
穂肥尿素+CDU	708	1443	41.1	579	34.3	37.8	14.0
全量基肥 IB	673	1390	40.7	550	35.9	37.2	10.2
全量分けつ肥 CDU	721	1433	42.4	557	36.3	35.5	10.5
全量基肥 LP30	709	1441	41.3	553	36.0	40.2	12.3
2017/18 年							
慣行分施	525	1310ab	35.0	436	39.2	38.9	10.9
穂肥重点施肥	513	1449a	31.0	452	38.4	37.9	11.6
穂肥尿素+CDU	485	1310ab	32.6	420	40.4	37.5	12.0
全量基肥 IB	478	1300ab	32.2	416	36.9	38.7	11.1
全量分けつ肥 CDU	477	1241b	31.8	403	36.1	37.8	11.5
全量基肥 LP30	491	1267ab	33.8	411	37.0	39.2	11.9
2018/19 年							
慣行分施	560	1339	36.6ab	452c	36.9	37.7	9.3
穂肥重点施肥	568	1316	37.8a	471bc	33.8	39.4	10.3
穂肥尿素+CDU	565	1313	37.6a	510ab	33.9	38.8	9.2
全量穂肥 CDU	595	1390	37.4a	558a	33.2	37.9	10.0
全量基肥 LP30	535	1314	35.6b	457c	39.7	36.7	10.7

収量と千粒重は、子実を 2.2 mm の篩でふるった後、含水率を 12.5% に補正した値を示した。異なる英小文字が付された値は、Tukey の多重比較において処理区間に 5% 水準で有意差があることを示す。

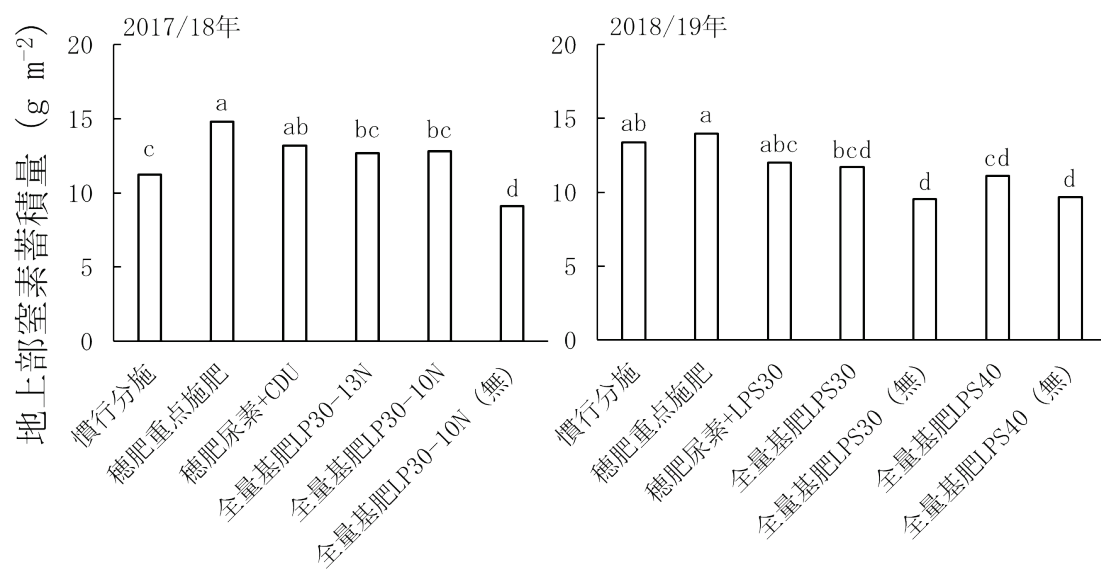
第 5-6 表 2017/18 年と 2018/19 年に山口県山口市で栽培した「せときらら」の収量，収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC)。

処理区	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)
2017/18 年							
慣行分施	513	1161ab	40.6	586	31.9b	36.3b	10.4b
穂肥重点施肥	559	1214a	41.9	551	36.5ab	37.7ab	12.7a
穂肥尿素+CDU	569	1200a	43.0	540	40.8a	37.2ab	10.9b
全量基肥 LP30-13N	532	1071ab	43.9	475	34.5ab	39.4a	12.2a
全量基肥 LP30-10N	480	1089ab	40.4	561	33.6b	35.6b	12.0a
全量基肥 LP30-10N (無)	484	1037b	41.7	517	33.3b	36.9ab	9.5c
2018/19 年							
慣行分施	670a	1437a	41.0b	436	37.2b	42.5b	10.2b
穂肥重点施肥	723a	1383ab	45.8a	385	47.1a	43.9ab	10.3ab
穂肥尿素+LPS30	599b	1252abc	41.9b	372	38.7b	44.8a	10.2b
全量基肥 LPS30	568b	1186bc	42.0b	379	36.8b	44.1ab	10.5ab
全量基肥 LPS30 (無)	561b	1187bc	41.4b	392	36.4b	42.1ab	8.4c
全量基肥 LPS40	512b	1115c	40.2b	339	37.7b	45.2a	11.2a
全量基肥 LPS40 (無)	522b	1095c	41.7b	329	37.7b	43.1ab	9.5bc

収量と千粒重は，子実を 2.2 mm の篩でふるった後，含水率を 12.5% に補正した値を示した．異なる英小文字が付された値は，Tukey の多重比較において処理区間に 5% 水準で有意差があることを示す．



第 5-1 図 2016/17 年から 2018/19 年の 3 作期に熊本県大津町で栽培した「ミナミノカオリ」の穂揃い期および成熟期における地上部窒素蓄積量. 異なる英小文字が付された値は, Tukey の多重比較において処理区間に 5%水準で有意差があることを示す.



第 5-2 図 2017/18 年と 2018/19 年に山口県山口市で栽培した「せときらら」の成熟期における地上部窒素蓄積量. 異なる英小文字が付された値は, Tukey の多重比較において処理区間に 5%水準で有意差があることを示す.

第5-7 表 2018/19 年に熊本県大津町で栽培した「ミナミノカオリ」の黄熟期 (5 月 17 日, GS81～83) における倒伏程度と稈長, 節間長および節間 1 cm あたり乾物重.

発生節位	処理区	倒伏程度 (0～5)	稈長 (mm)	節間長 (mm)			節間 1 cm あたり乾物重 (mg cm <sup>-1</sup> )		
				第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間	第 1 節間	第 2 節間	第 3 節間
主茎	慣行分施	2. 6	933	47. 5a	85. 9a	123b	23. 0	23. 8	21. 8a
	穂肥重点施肥	0. 8	913	43. 2a	84. 4ab	136a	24. 8	22. 0	19. 8ab
	全量穂肥 CDU	0. 0	914	27. 5b	77. 5b	122b	23. 4	22. 3	19. 4b
	全量基肥 LP30	2. 3	930	35. 9ab	76. 7b	119b	22. 8	22. 6	19. 7b
主茎第 1 節分げつ	慣行分施		924	52. 3	94. 4a	132b	19. 6	20. 7a	18. 7a
	穂肥重点施肥		901	48. 3	95. 7a	145a	20. 2	18. 5ab	16. 6b
	全量穂肥 CDU		885	38. 1	81. 9b	128b	19. 2	16. 6b	15. 2b
	全量基肥 LP30		912	50. 7	91. 2ab	133ab	16. 5	17. 2b	15. 6b
主茎第 2 節分げつ	慣行分施		874	47. 5b	96. 9a	136ab	16. 6	17. 4	15. 9
	穂肥重点施肥		880	49. 6ab	96. 6a	143a	18. 6	18. 4	16. 4
	全量穂肥 CDU		841	35. 3c	84. 6b	125b	14. 8	15. 4	14. 5
	全量基肥 LP30		917	58. 9a	102. 8a	138a	16. 5	15. 9	15. 7

異なる英小文字が付された値は, Tukey の多重比較において処理区間に 5%水準で有意差があることを示す. 穂肥尿素+CDU 区は, 茎立ち開始期以前の窒素施肥量が  
88

## 第6章 茎数を指標とした「せときらら」の生育診断と可変施肥法の検討

### 緒言

第2章と第3章では、穂肥重点施肥はパン用コムギの多収栽培に有効であることを明らかにした。一方で、2014/15年に山口県で「せときらら」を対象に行った試験では、播種前後の降水量が多かったため（第3-3表）、穂肥重点施肥区の穂数が慣行分施肥区に比べて増えず、収量も同程度であったことから（第3-4表）、第3章では初期生育を一定以上確保する必要性についても考察した。

穂肥重点施肥で安定的に多収を達成するには、生育診断とそれに基づく窒素の可変施肥（以下「可変施肥」とする）が有効である可能性がある。水稻では、高品質米生産のために分光放射計測や画像診断を用いた可変施肥技術が研究されている（鳥山 2008）。例えば分光放射計によって測定される正規化植生指数（NDVI）は、窒素蓄積量やクロロフィル含量、 $\text{m}^2$ あたり籾数との相関関係が報告されている（脇山 2005, 佐々木 2007）。コムギでも、近赤外光を用いることにより茎数が推定できること（Flowers ら 2001）やNDVIおよびレーザー式センサーの出力値（S1 値）で窒素蓄積量が推定できることから、これらの診断ツールが多収栽培に有効であることが報告されている（原ら 2015, 林 2015）。パン用コムギで可変施肥を活用するためには、診断時期の生育量や診断指標と窒素の追肥量や施肥時期、収量や子実タンパク質含有率の関係をより明確にする必要があると考えられる。

穂肥重点施肥をベースに可変施肥を行うには、茎数の管理が重要になると考えられる。穂肥重点施肥は、茎数を増やすために施用する基肥や分けつ肥（和田 2002）を省略するため（第2-2表, 第3-2表）、過湿土壌（小柳 2008, Robertson ら 2009）や生育初期の高温（田谷 1993）によって苗立ち数や茎数が抑制されれば、収量形成でとくに重要な穂数（稲村ら 2007）が少なくなり、



収量が慣行的な施肥方法に比べてより低下する危険性がある。一方で、茎数を診断し、それに応じた分けつ肥を追肥することによって最高分けつ期までに一定以上の茎数を確保できれば、穂肥重点施肥の茎の有効化率を高める効果（第2-4表）を生かし、穂数や収量を回復させられる可能性もある。

本章では、穂肥重点施肥で栽培したパン用コムギ品種「せときらら」を対象に、苗立ち不良を想定して播種量を制限した群落を作り、苗立ち数が少なくなった場合でも分けつ期の窒素追肥量を多くすれば、茎数や穂数を回復させ、収量の低下を軽減できるか検証した。

## 材料と方法

試験は、2017/18年と2018/19年に山口大学農学部附属農場（北緯34度15分，東経131度47分）で栽培したパン用コムギ品種「せときらら」を対象に行った。試験圃場は、2014年以降水田転換していないA圃（水稻作から播種までの期間は2017/18年と2018/19年でそれぞれ37か月および49か月）と稲作直後のB圃を用いた。A圃とB圃は、1965年ごろに造成されたそれぞれ40aの隣接する圃場であり、A圃でコムギ作を開始した2014/15年までは水稻を連作していた。土壌は、いずれの圃場も灰色低地土で同じ土質である。A圃における2015/16年の理化学性は、第3章に示した（第3-1表）。いずれの圃場も排水性が悪く、とくに多雨年では収量水準が低下しやすい。播種は、2017/18年では11月7日、2018/19年では11月12日に4条播種機で行った。栽培は、1.5m幅の畝たて様式で、畝中央に4条ドリル播きとした。2017/18年では、播種前に土壌改良資材として苦土入り石灰を $120\text{ g m}^{-2}$ 施用し、2018/19年ではミネラルGを $100\text{ g m}^{-2}$ 施用した。

2017/18年の処理区は、A圃では播種量2水準（標準播種量，少播種量）と

窒素の施肥時期 4 水準を組み合わせた 5 処理区を設け、B 圃では播種量 2 水準（標準播種量、少播種量）と窒素の施肥時期 4 水準を組み合わせた 7 処理区を設けた。播種量は、A 圃では標準播種量区で  $6 \text{ g m}^{-2}$ 、少播種量区で  $3 \text{ g m}^{-2}$  とした。B 圃では、過湿気味な土質により発芽不良が起こりやすいため、標準播種量区を  $9 \text{ g m}^{-2}$ 、少播種量区を  $6 \text{ g m}^{-2}$  とした。窒素肥料は、第 6-1 表に示したように尿素で施肥した。施肥時期は、基肥を 11 月 8 日、分けつ肥を 1 月 16 日（GS15）、穂肥Ⅰを 2 月 14 日（GS30）、穂肥を 2 月 27 日（GS32、基肥を施用した処理区のみ）、穂肥Ⅱを 3 月 30 日（GS37）とした。いずれの処理区も、開花期に窒素を  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう尿素で施肥した。処理区の配置は、4 反復の乱塊法とした。

2018/19 年でも、A 圃および B 圃でそれぞれ播種量 2 水準（標準播種量、少播種量）と窒素の施肥時期 4 水準を組み合わせた 8 処理区を設けた。播種量も 2017/18 年と同様とした。窒素肥料は、第 6-1 表に示したように尿素で施肥し、施肥時期は、基肥を 11 月 14 日、分けつ肥を 1 月 17 日（GS14）、穂肥Ⅰを 2 月 8 日（GS30）、穂肥を 2 月 27 日（GS31）、穂肥Ⅱを 3 月 15 日（GS37）とした。いずれの処理区も、開花期に窒素を  $6 \text{ g m}^{-2}$  となるよう尿素で施肥した。処理区の配置は、4 反復の乱塊法とした。

作土層の体積含水率は、土壤水分センサー（EC-5, Decagon Devices）を用いて計測した。センサーは、地表面から深さ 10 cm および 20 cm にそれぞれ 2 点ずつ水平に埋設、測定したが、A 圃と B 圃のいずれも同様に推移したため、結果は省略した。

茎数の調査は、2017/18 年では GS15（1 月 16 日）と GS30（2 月 19 日）に行った。2018/19 年では、GS10（苗立ち数、11 月 28 日）と GS14（1 月 15 日）、GS30（2 月 13 日）に行った。茎数は、4 条を条に沿って 0.5 m 分計測し、調査面積（ $0.75 \text{ m}^2$ ）で除することにより求めた。

成長解析のためのサンプリングは、2017/18 年では GS30 (2 月 15 日)、穂揃い期 (4 月 11 日, GS55) および成熟期 (5 月 30 日, GS92) に行った。2018/19 年でも、GS30 (2 月 4 日)、GS55 (4 月 8 日) および GS92 (5 月 31 日) に行った。調査内容は、緑面積指数 (GAI) と個体群成長速度 (CGR)、純同化率 (NAR) および地上部窒素蓄積量とした。調査方法は、いずれの項目も第 3 章と同様とした。

収量調査は、2017/18 年では 5 月 30 日に行い、2018/19 年では 5 月 31 日に行った。調査内容は、収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率とした。収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率の調査方法は、第 2 章と同様とした。

気象データは、栽培場所と栽培期間が第 5 章と同じであるため、本章では省略した (第 5-4 表)。

統計処理は、2017/18 年では Tukey の多重比較を行った。2018/19 年では二元配置の分散分析を行い、有意差があった場合には Tukey の多重比較を行った。

## 結果

第 6-2 表は、2017/18 年における収量、収量構成要素、子実タンパク質含有率 (GPC) を示す。収量は、A 圃と B 圃のいずれも 6-3-4-0 区以外の処理区で約  $550 \text{ g m}^{-2}$  と 6-3-4-0 区に比べて高くなる傾向があった。全乾物重は処理による差はなく、A 圃と B 圃のいずれも約  $1100 \text{ g m}^{-2}$  であった。収穫指数は、A 圃では播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  の 0-3-6-4 区と 0-5-6-2 区が播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区に比べて有意に高かった。B 圃では処理による差がなくいずれも約 43% であった。

穂数は、A 圃では播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区が播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  の 0-3-6-4 区に比べて有意に多かった。0-5-6-2 区も播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区に比べると少なくなる

傾向があったが、有意な差はなかった。B 圃では処理による差がなく、約 500 本  $\text{m}^{-2}$  であった。一穂粒数は、A 圃では播種量 3  $\text{g m}^{-2}$  の 0-3-6-4 区と 0-5-6-2 区が播種量 6  $\text{g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区に比べて有意に多かった。B 圃では処理による差はなく、約 33 粒であった。千粒重は、いずれの圃場も処理による差はなく、A 圃で約 37 g, B 圃で約 42 g であった。GPC は、いずれの圃場も 6-3-4-0 区が約 11% と他の処理区の約 12.5% に比べて有意に低かった。

第 6-3 表には、2018/19 年における収量、収量構成要素と GPC を示した。収量は、A 圃と B 圃の穂肥重点施肥区（5-3-3-0 区以外）でそれぞれ約 700  $\text{g m}^{-2}$  および約 750  $\text{g m}^{-2}$  と、5-3-3-0 区に比べて高くなる傾向があった。少播種量区の収量は標準播種量区と同程度であった。2018/19 年の収量は、2017/18 年やそれ以前の作期（第 3-4 表）の水準に比べて顕著に高かった。全乾物重は処理による差はなく、いずれの圃場も約 1400  $\text{g m}^{-2}$  であった。収穫指数は、A 圃ではいずれの処理区も同程度であったが、B 圃ではいずれの播種量でも 5-3-3-0 区が 0-2-6-3 区に比べて有意に低かった。

穂数は、いずれの圃場も処理による差がなく、A 圃で約 400 本  $\text{m}^{-2}$ 、B 圃で約 500 本  $\text{m}^{-2}$  であった。一穂粒数は、いずれの圃場でも 0-0-6-5 区が播種量 6  $\text{g m}^{-2}$  の 5-3-3-0 区に比べて有意に多かった。千粒重は、いずれの圃場も約 44 g であった。GPC は、A 圃では播種量 3  $\text{g m}^{-2}$  の 5-3-3-0 区が 0-0-6-5 区や 0-2-6-3 区に比べて有意に少なかった。B 圃ではいずれの処理区も約 11% であった。交互作用は、収量、収量構成要素、GPC のいずれもなかった。

第 6-1 図は、2017/18 年と 2018/19 年に栽培した「せときらら」の苗立ち数、4 葉期（GS14）または 5 葉期（GS15）と茎立ち開始期（GS30）の茎数および成熟期の穂数を示す。2017/18 年の A 圃では、GS15 の茎数が播種量 3  $\text{g m}^{-2}$  の区で約 300 本  $\text{m}^{-2}$  と播種量 6  $\text{g m}^{-2}$  区の約 550 本  $\text{m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった。GS30

でも播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  の区が播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の区に比べて有意に少なかった。GS30 の茎数は、分けつ期窒素追肥量を多くしても増加しなかった。GS30 から成熟期（穂数）にかけて、播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区では無効化した茎がほとんどなく、播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区ではいずれの窒素施肥区も約  $100 \text{ 本 m}^{-2}$  の茎が無効化した。成熟期の穂数は、播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区が播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区に比べて多くなった。B 圃では、GS15 の茎数が播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区で  $509 \text{ 本 m}^{-2}$  と、播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の他の処理区に比べて有意に多かった。播種量  $9 \text{ g m}^{-2}$  区は、いずれも約  $400 \text{ 本 m}^{-2}$  であった。GS30 では、いずれの播種量および分けつ期窒素追肥量でも約  $500 \text{ 本 m}^{-2}$  であった。GS30 から成熟期にかけて播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区と播種量  $9 \text{ g m}^{-2}$  の 0-5-5-3 区および 0-7-4-2 区は約  $50 \text{ 本 m}^{-2}$  の茎が無効化した。成熟期の穂数は、いずれの播種量および分けつ期窒素追肥量でも約  $500 \text{ 本 m}^{-2}$  であった。

2018/19 年の A 圃では、播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区の苗立ち数が約  $80 \text{ 本 m}^{-2}$  と播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区の  $120 \text{ 本 m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった。GS30 では、播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区の茎数は、分けつ期窒素追肥量にかかわらず約  $400 \text{ 本 m}^{-2}$  であった。B 圃でも播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区の苗立ち数は約  $120 \text{ 本 m}^{-2}$  であった。GS14 以降の茎数の推移は、播種量と分けつ期窒素追肥量のいずれの要因に関しても、2017/18 年の B 圃と同様であった。いずれの生育ステージでも、播種量と窒素施肥の間に交互作用はなかった。

第 6-2 図には、2017/18 年と 2018/19 年に栽培した「せときらら」の茎立ち開始期（GS30）と穂揃い期（GS55）、成熟期（GS92）の地上部窒素蓄積量を示した。2017/18 年の A 圃では、GS30 の地上部窒素蓄積量が播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区で約  $1.4 \text{ g m}^{-2}$  と播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区の約  $2.5 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった。GS30 の地上部窒素蓄積量は、いずれの分けつ期窒素追肥量でも同程度であった。GS55 の地上部窒素蓄積量は、播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なく約  $10 \text{ g m}^{-2}$  であった。

た. GS92 の地上部窒素蓄積量は, 6-3-4-0 区が他の処理区に比べて約 25%有意に少なかった. B 圃では, GS30 の窒素蓄積量が播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なくいずれも約  $1.2 \text{ g m}^{-2}$  であった. GS55 では, 播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  の 6-3-4-0 区が  $7.9 \text{ g m}^{-2}$  と他の処理区の約  $11 \text{ g m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった. GS92 でも 6-3-4-0 区は他の処理区に比べて有意に少なかった. 2018/19 年でも 2017/18 年と同様に, GS30 では 5-3-3-0 区が他の処理区に比べて有意に多いものの, 分けつ期窒素追肥量による差はなく, GS55 以降では 5-3-3-0 区のような生育前期重点型施肥で有意に少なかった. いずれの生育ステージでも, 播種量と窒素施肥の間に交互作用はなかった.

第 6-4 表には, GS30 以降の個体群成長速度 (CGR), 緑面積指数 (GAI) および純同化率 (NAR) を示した. CGR は, 2017/18 年の GS30 から GS55 では分けつ期窒素追肥量による差はなかったが, 播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区が播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区に比べて  $1.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  高くなる傾向があった. GS55 から GS92 では, 播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区が播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区に比べて  $0.9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  高くなる傾向があった. 2018/19 年では, いずれの生育ステージ間においても播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なく同程度であった. GAI は, 2017/18 年の GS30 では基肥と分けつ肥を最も多く施用した 6-3-4-0 区が  $2.00 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  と最も高かった. 播種量  $3 \text{ g m}^{-2}$  区では, 播種量  $6 \text{ g m}^{-2}$  区に比べて約 38%低くなる傾向があった. GS55 では, 播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なく同程度であった. 2018/19 年では, いずれの生育ステージにおいても播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なく同程度であった. NAR は, 2017/18 年と 2018/19 年のいずれも播種量や分けつ期窒素追肥量に関係なく同程度であった. 交互作用は, CGR, GAI, NAR のいずれもなかった.

## 考察

本章では、少播種量区を設けることによって人為的に  $\text{m}^2$  あたり茎数不足となった群落を作り、分げつ期の窒素追肥量を増やすことによって収量の減少を軽減できるかどうかを検証した。その結果、「コムギを穂肥重点施肥で栽培する場合は、分げつ期の茎数診断と分げつ期における窒素追肥の可変施肥を行うことよりは、むしろ苗立ち数を確保することが重要である」という結論に至った。以下にこの結論について説明する。

穂肥重点施肥条件下では、分げつ期窒素追肥量を増やしても、それが地上部窒素蓄積量や茎数、葉面積を増やすようには作用しないことが明らかになった。従来の生育前期重点型の施肥体系では、茎数や穂数は基肥や分げつ肥の窒素施肥量を増肥することによって増加することが知られている（江口ら 1969, Tamaki ら 1999, 福寫ら 2001, 竹内ら 2006）。そのため本章では、苗立ち数が少なく茎数不足になった場合でも分げつ期の窒素追肥量を増やすことによって茎数が多くなり、穂数を確保しやすくなることによって減収程度を小さくできると考えた。しかし、穂肥重点施肥で育てたコムギ群落では、GS30 の茎数は茎立ち期までに低温が続いた 2017/18 年でも、暖冬だった 2018/19 年でも分げつ期の窒素追肥量に応じて増加するわけではなかった（第 6-1 図）。成長量に目を向けると、分げつ期に窒素追肥量を増加しても GS30 の地上部窒素蓄積量は茎数と同様に増加せず（第 6-2 図）、GAI や CGR も高まらなかった（第 6-4 表）。分げつ肥の増肥によって茎数や穂数が多くなるとした先行研究は、基肥を多く施用した場合（江口ら 1969）やポット試験におけるものであり（Tamaki ら 1999）、圃場試験で穂肥重点施肥のように基肥を省略した場合では異なる結果となると考えられた。また、本研究と同様に分げつ肥は茎数を増やさなかったこともこれまでに報告されており（土谷 2012）、分げつ肥の効果については今後、基肥の

施用量も考慮した検証が必要であると考えられた。

穂肥重点施肥で栽培した少播種量区の「せときらら」は、分けつ期の窒素追肥量に関係なく標準播種量区の生育前期重点型施肥区で栽培したコムギよりも多収となった（第 6-2 表，第 6-3 表）。茎数をみると，基肥も分けつ肥も施用しない 2018/19 年の 0-0-6-5 区や，分けつ期までの窒素施肥量が最少であった 2017/18 年の 0-3-6-4 区（A 圃）や 0-3-7-3 区（B 圃）でも，GS30 には茎数が 400 本  $\text{m}^{-2}$  以上となった（第 6-1 図）。しかも，少播種量区の穂肥重点施肥区では有効茎歩合が 85%以上と極めて高く（第 6-1 図），成熟期の穂数も最少でも 350 本  $\text{m}^{-2}$  を確保することができた（第 6-3 表，第 6-1 図）。本州以南のコムギ栽培では，基肥と分けつ肥に出穂前総窒素施肥量の 60%以上を施用する体系が一般的であり，条件によっては最高茎数が 1200 本  $\text{m}^{-2}$  となり，無効茎が有効茎の 3 倍以上になることがある（土谷 2012）。それに対し，著者らがパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」（第 2-4 表）や「せときらら」（データ省略）で確認した結果，穂肥重点施肥では 1 株当たりで主茎，第 1 節分けつ，第 2 節分けつ，第 3 節分けつの 4 本が無効化することなくほぼ有効化し，さらに株や条件によっては鞘葉節分けつも有効化した。本州以南の目標収量を仮に 500  $\text{g m}^{-2}$  とすると，必要な穂数は，過去 3 作期における穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」（第 3-4 表）から得られた千粒重約 39.9  $\text{g}$  と一穂整粒数約 39.0 粒から計算して，約 320 本  $\text{m}^{-2}$  以上と算出される。本研究では，A 圃の少播種量区で苗立ち数が 80 本  $\text{m}^{-2}$  程度であったが（第 6-1 図），穂数は 350 本  $\text{m}^{-2}$  以上となり，収量が標準播種量区の 6-3-4-0 区や 5-3-2-0 区を上回ることが確認できた（第 6-2 表，第 6-3 表，第 6-1 図）。Tanaka ら（2019）は，穂数不足による収量低下は苗立ち数が 71 本  $\text{m}^{-2}$  未満であるときに起こることを報告しており，生育不良下における穂肥重点施肥の効果を検証するためには，苗立ち数がより少ない条件でも検討する必



要があると考えられた。

本研究の結論に関しては、気象や地力、品種などが異なる条件でも検証する必要があると考える。試験を行った 2017/18 年と 2018/19 年の降水量は、播種直後から茎立ち開始期（GS30）までの間にそれぞれ 150 mm と 162 mm と、その前の 3 作期（第 3-3 表）の 340 mm, 338 mm, 459 mm に比べて少なかった。麦類の分げつ発生数は、土壌の過湿状態や嫌気条件によって減少することから (Sharma and Swarup 1988, Robertson ら 2009)、播種期から茎立ち開始期に多雨となる環境では、分げつ期窒素追肥量に応じて茎数が増加する、あるいは一次分げつの有効歩合が低下するなどといった本研究とは相反する結果になることも予想される。地力についても同様に、圃場の地力が著しく低い場合には、穂肥重点施肥で栽培すると分げつの出現が抑制され、窒素追肥量に応じて茎数が増加する可能性もある。なお、本試験を行った圃場の土壌は粘土を多く含むため排水性が低く、降水後の地下水位低下も遅く（データ省略）、地力も低い（第 3-1 表）といった麦作に向かない圃場であり、通常の排水性や地力を備えた圃場であれば、これらは大きな問題とはならないと考えられる。品種に関しては、パン用コムギ品種「せときらら」が従来の品種に比べて穂数が多くなりやすい多収品種であったこと（高田ら 2017）から、分げつが出現あるいは有効化しにくい品種では、本研究とは異なる結果となる可能性もある。

## 摘要

生育診断とそれに基づく窒素の可変施肥は、コムギの高品質多収栽培に有効であるが、診断時期の生育量や診断指標、窒素の追肥量や施肥時期、収量や子実タンパク質含有率との関係についての知見は少ない。本研究では、穂肥重点施肥をベースに可変施肥を行うには、茎数の管理がとくに重要であると考え、少播種量区を設けることによって人為的に  $\text{m}^2$  あたり茎数不足となった群落を作り、分けつ期の窒素追肥量を増やすことによって収量の減少を軽減できるかどうかを検証した。少播種量区は、苗立ち数が約 80 本  $\text{m}^{-2}$  と標準播種量区の約 120 本  $\text{m}^{-2}$  に比べて有意に少なかった。4 葉期でも少播種量区は茎数が少なかったが、茎立ち開始期には分けつ肥を施用しなかった 0-0-6-5 区でも茎数 400 本  $\text{m}^{-2}$  以上となった。基肥を施用しない穂肥重点施肥体系で栽培した少播種量区では、茎の有効化率が 85% 以上と高く、成熟期の穂数および収量がそれぞれ約 400 本  $\text{m}^{-2}$  および約 700 g  $\text{m}^{-2}$  と、標準播種量区並みとなった。異なった栽培条件や品種でも検証する必要があるが、穂肥重点施肥では分けつ期に茎数を計り、それに応じて追肥量を決定する意義は薄く、むしろ苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確実に確保することが重要であると考えられた。

第 6-1 表 2017/18 年および 2018/19 年に栽培した「せときらら」における圃場ごとの播種量と窒素施肥時期、窒素施肥量。

処理区	A 圃での 播種量 (g m <sup>-2</sup> )	B 圃での 播種量 (g m <sup>-2</sup> )	窒素施肥量 (g m <sup>-2</sup> )					開花期 追肥	出穂前総窒素 施肥量	
			基肥	分けつ肥	穂肥Ⅰ	穂肥	穂肥Ⅱ			
2017/18 年										
0-3-6-4	3 又は 6	—	—	3	6	—	4	6	13	
0-5-6-2	3	—	—	5	6	—	2	6	13	
6-3-4-0	6	6	6	3	—	4	—	6	13	
0-3-7-3	—	6 又は 9	—	3	7	—	3	6	13	
0-5-5-3	6	6 又は 9	—	5	5	—	3	6	13	
0-7-4-2	—	6 又は 9	—	7	4	—	2	6	13	
2018/19 年										
5-3-3-0	3 又は 6	6 又は 9	5	3	—	3	—	6	11	
0-0-6-5	3 又は 6	6 又は 9	—	—	6	—	5	6	11	
0-2-6-3	3 又は 6	6 又は 9	—	2	6	—	3	6	11	
0-4-5-2	3 又は 6	6 又は 9	—	4	5	—	2	6	11	

2017/18 年は、基肥を GS00、分けつ肥を GS15、穂肥 I を GS30、穂肥を GS32、穂肥 II を GS37 に施用した。2018/19 年は、基肥を GS00、分けつ肥を GS14、穂肥 I を GS30、穂肥を GS31、穂肥 II を GS37 に施用した。GS は、Zadoks ら (1974) の生育ステージを示す。2017/18 年の A 圃の播種量 6 g m<sup>-2</sup> 区は、GS30 の生育量が多かったため、倒伏を避ける目的で 0-5-6-2 を 0-5-5-3 とした。

第 6-2 表 2017/18 年における水稻作から播種までの期間が異なる 2 圃場の播種量や分けつ期窒素追肥量を異にする「せときらら」の収量，収量構成要素，子実タンパク質含有率 (GPC)。

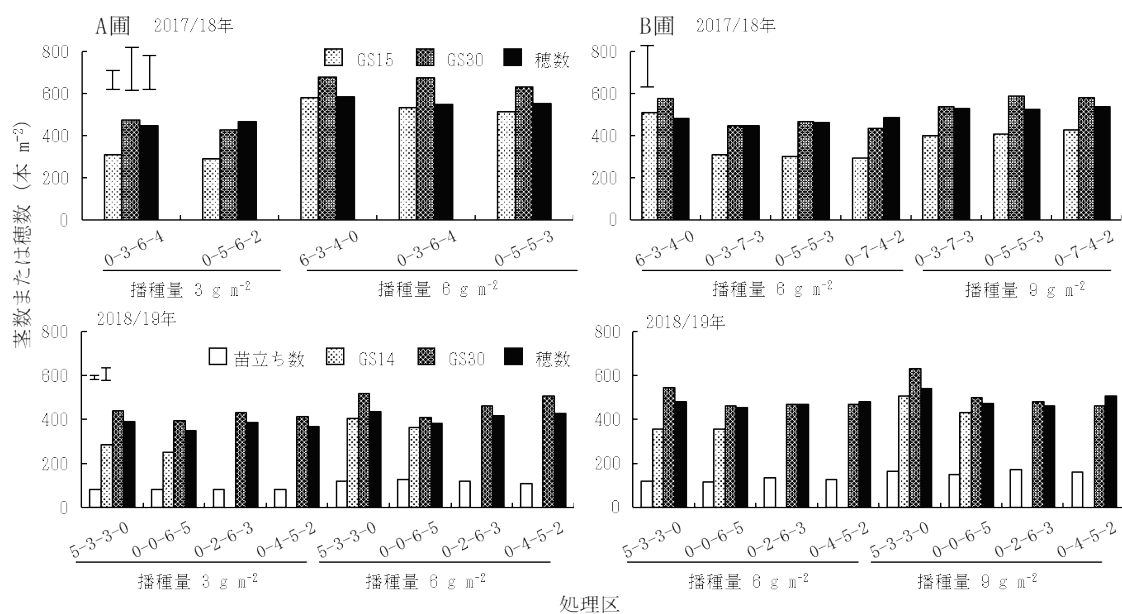
圃場	播種量 (g m <sup>-2</sup> )	窒素施肥 (g m <sup>-2</sup> )	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫指数 (%)	穂数 (m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数	千粒重 (g)	GPC (%)
A 圃 (37 カ月)	3	0-3-6-4	546	1139	43.8a	449b	40.5a	37.3	12.7a
	3	0-5-6-2	556	1141	43.7a	468ab	41.1a	37.9	12.5a
	6	6-3-4-0	513	1161	40.6b	586a	31.9b	36.3	10.4b
	6	0-3-6-4	559	1214	41.9ab	551ab	36.5ab	37.7	12.7a
	6	0-5-5-3	537	1162	41.6ab	555ab	37.0ab	36.5	12.6a
B 圃 (1 カ月)	6	6-3-4-0	500	1003	42.6	481	30.1	41.6	11.5b
	6	0-3-7-3	530	1022	44.7	448	33.8	41.9	12.6a
	6	0-5-5-3	539	1088	42.6	463	31.0	41.1	12.5a
	6	0-7-4-2	578	1138	43.9	486	33.7	41.1	12.6a
	9	0-3-7-3	607	1183	44.4	529	33.4	42.3	12.7a
	9	0-5-5-3	562	1150	42.7	528	33.8	40.8	12.4a
	9	0-7-4-2	559	1151	43.0	538	33.1	38.9	12.6a

「圃場」の括弧内の月数は，水稻作から播種までの期間を示す。収量および千粒重は，2.2 mm の篩でふるい，水分含水率を 12.5% に補正した値を示す。異なる英小文字は，Tukey の検定において同一圃場内で有意差 (P<0.05) があることを示す。

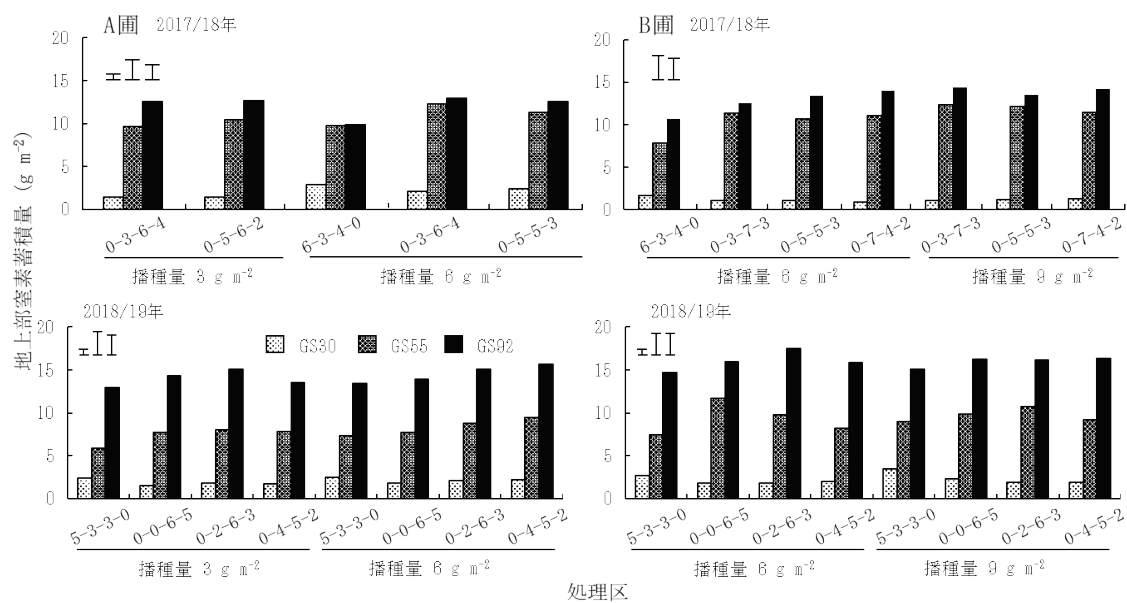
第 6-3 表 2018/19 年における水稻作から播種までの期間が異なる 2 圃場の播種量や分けつ期窒素追肥量を異にする「せときらら」の収量、収量構成要素、子実タンパク質含有率 (GPC)。

圃場	播種量 (g m <sup>-2</sup> )	窒素施肥 (g m <sup>-2</sup> )	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫指数 (%)	穂数 (m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数	千粒重 (g)	GPC (%)
A 圃 (49 カ月)	3	5-3-3-0	664	1372	42.4	390	42.5ab	44.2	9.9b
	3	0-0-6-5	681	1359	43.8	350	49.5a	44.9	11.1a
	3	0-2-6-3	743	1451	44.8	389	47.2a	44.2	11.0a
	3	0-4-5-2	689	1403	43.0	370	43.5ab	44.4	10.6ab
	6	5-3-3-0	670	1437	41.0	438	37.2b	42.5	10.2ab
	6	0-0-6-5	723	1383	45.8	386	47.1a	43.9	10.3ab
	6	0-2-6-3	722	1432	44.2	419	44.7ab	43.4	10.7ab
	6	0-4-5-2	752	1481	44.5	429	42.1ab	43.7	11.0a
分散分析		播種量	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		窒素施肥	ns	ns	ns	ns	**	ns	*
		交互作用	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B 圃 (1 カ月)	6	5-3-3-0	695	1376	44.2bc	480	37.2b	43.9	11.1
	6	0-0-6-5	781	1460	46.8ab	453	47.1a	44.3	11.2
	6	0-2-6-3	807	1490	47.4a	469	44.7ab	44.1	11.1
	6	0-4-5-2	777	1479	46.0ab	479	42.1ab	44.4	11.1
	9	5-3-3-0	733	1491	43.0c	540	42.5ab	43.0	11.3
	9	0-0-6-5	785	1450	47.3a	473	49.5a	44.0	11.1
	9	0-2-6-3	763	1429	46.7ab	461	47.2a	44.4	11.3
	9	0-4-5-2	770	1447	46.7ab	509	43.5ab	43.3	11.1
分散分析		播種量	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		窒素施肥	ns	ns	**	ns	*	ns	ns
		交互作用	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

「圃場」の括弧内の月数は、水稻作から播種までの期間を示す。収量および千粒重は、2.2 mm の篩でふるい、水分含水率を 12.5% に補正した値を示す。\*, \*\* は、分散分析においてそれぞれ 5% および 1% 水準で有意差があることを示す。異なる英小文字は、Tukey の検定において同一圃場内で有意差 (P<0.05) があることを示す。



第 6-1 図 2017/18 年と 2018/19 年に栽培した「せときらら」の A 圃 (左) および B 圃 (右) における苗立ち数, 4 葉期 (GS14) または 5 葉期 (GS15) と茎立ち開始期 (GS30) の茎数および成熟期の穂数. 左上のバーは, 圃場および生育ステージが同じ処理区間で Tukey の多重比較における 5%水準の Honestly Significant Difference (HSD) を示す.



第6-2 図 2017/18年と2018/19年に栽培した「せときらら」のA圃（左）およびB圃（右）における茎立ち開始期（GS30）と穂揃い期、成熟期の地上部窒素蓄積量. 左上のバーは、圃場および生育ステージが同じ処理区間で Tukey の多重比較における 5%水準の Honestly Significant Difference (HSD) を示す.

第 6-4 表 A 圃で栽培した「せときらら」における GS30 以降の個体群成長速度 (CGR), 緑面積指数 (GAI) および純同化率 (NAR).

窒素施肥 (g m <sup>-2</sup> )	播種量 (g m <sup>-2</sup> )	CGR (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		GAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )		NAR (g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
		GS30 - GS55	GS55 - GS92	GS30	GS55	GS30 - GS55
2017/18 年						
0-3-6-4	3	12.4	8.43	0.92	8.7	1.56
0-5-6-2	3	12.5	8.40	0.72	9.9	1.56
6-3-4-0	6	13.5	7.16	2.00	10.8	1.13
0-3-6-4	6	14.4	7.66	1.24	11.0	1.41
0-5-5-3	6	13.6	7.25	1.30	9.9	1.40
2018/19 年						
5-3-3-0	3	9.6	13.3	0.92	5.58	1.62
0-0-6-5	3	9.4	13.6	0.67	6.63	1.56
0-2-6-3	3	9.9	14.6	0.73	6.07	1.71
0-4-5-2	3	10.1	13.6	0.65	6.31	1.76
5-3-3-0	6	11.0	12.9	0.93	7.09	1.58
0-0-6-5	6	9.3	13.9	0.86	6.76	1.41
0-2-6-3	6	10.3	13.5	1.03	6.69	1.49
0-4-5-2	6	11.5	13.3	0.87	6.98	1.74

GS30 (茎立ち開始期) は, 2017/18 年と 2018/19 年でそれぞれ 2 月 15 日と 2 月 4 日, GS55 (穂揃い期) はそれぞれ 4 月 11 日と 4 月 8 日であった.





## 第7章 総合考察

本研究では、西南暖地向けパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」と「せときらら」を対象として、多収と高品質（高子実タンパク質含有率）の両立を目的に、基肥と分けつ肥の窒素施肥を省略し、その分穂肥窒素を増肥する「穂肥重点施肥」の効果を検証した。また、穂肥重点施肥が倒伏を助長しない原因や省力型穂肥重点施肥法、茎数を指標とした可変型穂肥重点施肥法についても検証した。本章では、第2章から第6章の研究結果を総括的に考察するとともに、本研究で得た知見をもとにさらなる高品位多収栽培法や、より省力的で実践的な栽培方法についても考察した。また、5作期の栽培試験での結果やそこで得た知見から、穂肥重点施肥で栽培する際のポイントを整理し、栽培暦を作成した。

まずは、パン用コムギの施肥体系を「基肥重点型」から「穂肥重点型」にする利点を整理する。本研究では、穂肥重点施肥はパン用コムギの収量を高めるために有効な栽培方法であると結論した。窒素施肥がコムギにおよぼす影響は品種によって異なるため（Noureldin ら 2013, Büchi ら 2016）、本研究では異なる特徴を持ったパン用コムギ品種として「せときらら」と「ミナミノカオリ」を供試したが（藤田ら 2009, 高田ら 2017）、穂肥重点施肥はいずれの品種でも慣行分施肥区に比べて穂数を増やすことによって収量を高めた（第2-3表、第3-4表）。穂肥重点施肥区で穂数が多くなった原因は、主茎第3節分けつにおける有

効化した茎の発生率を高めたためであった（第 2-4 表）。分げつの有効化率は、茎立ち期中の窒素追肥によって高まるため（江口ら 1969, 倉井ら 1998）、茎立ち期中に慣行分施の 3 倍以上の窒素を追肥する穂肥重点施肥（第 2-2 表, 第 3-2 表）は、主茎の高位節から発生した分げつの有効化率を高めたと考えられる。茎立ち期に窒素を多く施用すると、本来無効化する軽い茎まで有効化してしまい、遅れ穂が増加する可能性も指摘されているが（倉井ら 1998）、穂肥重点施肥区では、最も高位節から発生していた主茎第 3 節分げつの乾物重が成熟期には主茎第 2 節分げつと同等となっており（第 2-1 図）、本来無効化する軽い茎が有効化して遅れ穂になる（鎌田ら 2016）ことはなかった。

穂肥重点施肥は、パン用コムギの高品質栽培にも適していた。コムギの子実タンパク質含有率は、収量が増加するほど低下しやすくなる（江口ら 1969, 岩渕ら 2011, Hitz ら 2017）。しかし、穂肥重点施肥で栽培した「せときらら」と「ミナミノカオリ」の子実タンパク質含有率は、いずれの品種も収量が慣行分施と同等のときでは高く、収量が高まった時期でも低下しなかった（第 2-3 表, 第 3-4 表, 第 4-4 表, 第 5-6 表, 第 6-2 表）。子実タンパク質含有率が高まった原因は、穂肥重点施肥区では慣行分施に比べて成熟期の地上部窒素蓄積量が多くなったためであった（第 2-2 図）。地上部窒素蓄積量が多くなった原因は、穂肥重点施肥では窒素の吸収効率が低い茎立ち期の窒素追肥（石丸ら 2016）を

慣行分施の3倍以上施用している（第2-2表、第3-2表）ことに加え、GS30以降の個体群成長速度（CGR）や純同化率（NAR）が高まったことによって（第3-6表）茎立ち期以降の乾物蓄積量が多く、地上部窒素蓄積量も多くなったためであると考えられた。

パン用コムギの高品位多収栽培では、成熟期までに窒素を効率的に吸収させることが重要であると考えられた。コムギの収量は、成熟期の地上部窒素と正の相関関係があることが知られており（Hitzら 2017）、コムギの地上部窒素蓄積量を高めるには、乾物蓄積が盛んな茎立ち期から開花期の間に窒素を多施用することが有効である（Mengら 2013）。穂肥重点施肥は、この時期の窒素追肥量が慣行分施の3倍以上と多かったため（第2-2表、第3-2表、第5-1表、第5-2表）、いずれの作期も成熟期の地上部窒素蓄積量が慣行分施と同等以上となった（第2-2図、第5-1図、第5-2図）。穂肥重点施肥で多収となった原因は、茎の有効化率が高まることによって穂数が多くなったためであったが（第2-3表、第2-4表、第3-4表）、これは地上部窒素蓄積量が多くなることによって（第2-2図、第5-1図、第5-2図）、主茎第2節分げつや主茎第3節分げつで窒素や乾物が競合しなかったため（第2-1図、第7-1図）であると考えられた。また、成熟期の地上部窒素蓄積量が多くなることは、子実タンパク質含有率を高く維持するためにも有効であった（第2-3表、第3-4表）。従来の施肥体系で重要視

されていた茎立ち期以前の窒素施肥は窒素の吸収率が低く（石丸ら 2016）、群落の被覆率を上げることによって倒伏の危険性も高めることから（第 4-2 表、第 4-3 表、第 4-2 図）、パン用コムギの高品位多収栽培では茎立ち期以降に窒素を重点的に施肥する施肥体系が適していると考えられた。

基肥と分けつ肥の窒素施肥量を抑えた栽培方法は、茎立ち期に窒素を多投入したにもかかわらずむしろ倒伏の危険性を低下させた。これまでは、茎立ち期の窒素追肥は収量を高めるが稈長も伸ばし、倒伏の危険性を高めるとされてきた（江口ら 1969、倉井ら 1998）。しかし、基肥と分けつ肥を省略した穂肥重点施肥区では、穂肥を最大で慣行分施肥区の 7.5 倍も施用したにもかかわらず（第 2-2 表）、成熟期の草丈がむしろ低かった（第 2-3 表）。また、成熟期の倒伏程度は基肥の窒素施肥量が少なく、GS30 の GAI が低いほど有意に低下した（第 3-5 表、第 3-6 表）。以上の結果から、倒伏を助長する原因は茎立ち期の窒素追肥でなく、茎立ち開始期に過繁茂な群落になることによって光競合が起きるためと仮説を立て、第 4 章で検証した。その結果、茎立ち期に遮光処理を施した処理区や GS30 の GAI および被覆率が高かった前期重点施肥区（第 4-2 表）では、下位の節間長が長く（第 4-3 表）、稈の強度と正の相関関係がある節間 1 cm あたり乾物重（Zheng ら 2016）が軽くなることによって倒伏が助長された（第 4-2 表、第 4-3 表）。一方、GS30 までの生育量が抑えられた穂肥重点施肥区では、茎立ち期に窒

素を前期重点施肥区の 3 倍も施用したにもかかわらず倒伏程度が低く（第 4-2 表），収量が同等以上となった（第 4-4 表）．これらの結果は，GS30 に速効性肥料である尿素を施用した場合だけでなく，GS30 に肥効調節型肥料である CDU を施用した場合でも同様であったことから（第 5-7 表），GS30 以前の生育を抑えた穂肥重点施肥は，倒伏回避の観点からもコムギの栽培に有効な栽培方法であると考えられた．

「せときらら」では，苗立ち数を 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上確保し，肥効調節型肥料を全量穂肥施用することによって省力的かつ安定的に多収を達成できると考えられた．肥効調節型肥料である CDU と速効性肥料（本研究では尿素）を全量穂肥に施用する施肥体系は，省力的に分施型の穂肥重点施肥の肥効を再現するために有効であった（第 5-5 表，第 5-6 表，第 5-1 図，第 5-2 図）．穂肥重点施肥では，苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確保すれば，茎の有効化率を高める特性を生かし（第 6-1 図），500  $\text{g m}^{-2}$  以上の収量を安定的に確保できたことから（第 6-2 表，第 6-3 表），省力型の穂肥重点施肥でも苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確保すれば安定して収量を確保できると考えられる．また，苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確保すれば，茎立ち期以前に窒素を追肥する必要がなく（第 6-2 表，第 6-3 表，第 6-1 図，第 6-2 図），茎立ち開始期の生育量を抑えることができるため，倒伏の危険性も低下させられると考えられる．一方で，第 6 章でも考察したように，「ミナミノ

カオリ」のような分げつが増えにくい品種（藤田ら 2009）では異なった結果となる可能性もあるため、安定的に多収を達成できる栽培方法については、今後様々な品種や気象条件でも検証する必要があると考えられる。

次に、本研究を通じて得られた結果から考えられる改良点についても考察する。収量水準をこれまで以上に高めるためには、播種量や播種様式の改良も必要であると考えられた。本研究では、通常の穂肥重点施肥以上の収量を目標に多肥区も設けたが（第 2-2 表，第 3-2 表），「ミナミノカオリ」と「せときらら」のいずれも収量が高まらなかった（第 2-3 表，第 3-5 表）。これらの処理区では、収量と密接な関係がある成熟期の地上部窒素蓄積量（Hitz ら 2017）も増えていなかった（第 2-2 図，第 3-1 図）。Meng ら（2013）は、最適窒素施肥量を超えて窒素を施用する場合、さらに収量や地上部窒素蓄積量を高めるためには栽培様式を改良する必要があると指摘しているため、本研究では播種密度を高めた 4 条密植区やコムギ個体間の距離を広めた 8 条密植区を設けた。8 条密植区は個体間の距離が広がるため、4 条密植区に比べて節間 1 cm あたり乾物重や節間 1 cm あたりリグニン含有量は増加したが、通常の穂肥重点施肥区に比べて穂数が増えず、収量も高まらなかった（第 4-4 表）。収量は、密植によって穂数が確保しやすくなって高まるが（Xiao ら 2015, Tigabu and Asfaw 2016），一穂粒数や千粒重が減少することによって増加しない場合（Webster and Jackson 1993, 福嶋

ら 2004) もある。同様に条間を狭めることも収量を高める場合 (Hussain ら 2012) と高めない場合 (Hussain ら 2003, Tigabu and Asfaw 2016) が報告されている。また、播種様式が収量に及ぼす影響は、品種によって異なるため (Hussain ら 2003, Abichou ら 2019), さらなる多収を目指すには、様々な播種密度、播種様式および品種を組み合わせるその効果を検証する必要があると考えられる。

省力的かつ安定的に子実タンパク質含有率を高められる栽培方法について今後検討する必要がある。子実タンパク質含有率を高めるために有効な開花期前後の窒素追肥 (高山ら 2004, 岩渕ら 2007, 島崎ら 2014, 石丸ら 2015) は、肥効調節型肥料を用いることによって省略できる可能性が示唆されているが (中司ら 2010), 本研究で肥効調節型肥料 (LPS30 と LPS40) を用いて開花期追肥の省略を試みた区では (第 5-2 表), 子実タンパク質含有率が高まらなかった (第 5-6 表)。また、成熟期の地上部窒素蓄積量は LPS30 を茎立ち開始期に追肥しても高まらなかった (第 5-2 図)。被覆尿素は、溶出速度が気温や土壌水分に影響されやすいため (Guertal 2009), 本研究のような暖冬で降水量が少ない作期 (第 5-4 表) では適切な時期に溶出しなかったと考えられる。それに対し, CDU は茎立ち開始期に施用することによって安定的に子実タンパク質含有率や地上部窒素蓄積量が高まった (第 5-5 表, 5-1 図, 5-2 図)。これは, CDU が微生



物分解によって溶出する肥効調節型肥料であり、気象の影響を受けにくいと考えられる。本研究で用いた CDU は 20 日溶出タイプであったため、開花期前後まで肥効が継続しなかった可能性が高いが、長期溶出タイプを用いることによって開花期頃まで安定して肥効を維持できる可能性もある。また、「せときらら」では、開花期追肥を施用した場合でも子実タンパク質含有率が 11.5% を下回る作期もあり（第 3-4 表）、今後は生育診断を用いた最適な開花期窒素追肥量の推定についても研究していく必要があると考えられる。

本研究の結果を総括し、作成した栽培暦を第 7-2 図に示した。下記には、栽培暦を作成するために用いた研究結果や知見について項目ごとに考察した。

土づくり：堆肥を施用することによって、さらなる多収、高品質を達成できると考えられる。本研究の 2015/16 年作期では、熊本県の圃場で牛糞堆肥を基肥に  $1.25\text{kg m}^{-2}$  施用した区を設け、堆肥による増収効果を検証した。その結果、堆肥施用区は、穂肥重点施肥区に比べて収量が高まる傾向があった（第 7-1 表）。石丸ら（2016）は、安定同位体を用いた解析により、中華めん用品種ちくし W2 号の子実窒素は 41～49% が地力窒素に由来することを明らかにしており、穂肥重点施肥によるさらなる多収化を図るためには、地力を高めることも重要であると考えられた。

播種日：穂肥重点施肥では、早播きによって安定的に収量を確保できた。「せと

きらら」は分げつが出やすい品種のため、山口県の栽培指針では11月下旬の播種が奨励されている。そのため、2014/15年では適期に播種したが、播種前の降雨によって播種時の碎土性が悪く苗立ちが悪かったことに加え、播種直後にも降水量が多かったことによって（第3-3表）初期生育が明らかに劣っていた。そこで2015/16年では播種日を約2週間早めたところ、2014/15年よりも播種直後の降水量が多く（第3-3表）、登熟期の降水量も多かった（第3-3表）にもかかわらず2014/15年以上の収量および窒素収量（粒の窒素蓄積量、収量と子実窒素濃度から算出）となった（第3-4表）。以降の作期も11月上～中旬に播種したが、穂肥重点施肥では基肥や分げつ肥の窒素施肥量を抑えているため、早播きによって懸念される過繁茂な群落になることはなかった。早播きは、幼穂形成を早めることによって凍霜害の発生を助長することも指摘されているが（森崎ら 2018）、暖冬によって茎立ち期が最も早くなった2018/19年でも凍霜害が発生しなかった。一方で、本研究を行った5作期は茎立ち開始期以降に極端な低温になる作期がなかったことから（第3-3表、第5-4表）、茎立ち開始期以降に極端な低温が続く作期には異なる結果となる可能性もある。

播種量：播種量は、3～4 kg 10a<sup>-1</sup>にすることによって収量を確保しつつ、倒伏の危険性を低下させられると考えられる。山口県の栽培指針では、播種量 5～6 kg 10a<sup>-1</sup>を推奨しているが、穂肥重点施肥で栽培する場合は苗立ち数 80 本 m<sup>-2</sup>

以上あれば十分な収量を確保できることが明らかとなった（第 6-2 表，第 6-3 表，第 6-1 図）。「せときらら」の千粒重は，過去 5 作期の平均値から約 40 g であるため， $4\text{kg } 10\text{a}^{-1}$  の種子をまくことによって苗立ち数  $80 \text{ 本 } \text{m}^{-2}$  以上を確保できると考えられる．播種量を減らすことは茎立ち期中の光競合を軽減し，倒伏の危険性をさらに軽減できる可能性も高い．一方で，播種量についての研究は「せときらら」だけを対象にしたものであるため，他の品種でも今後検証する必要がある．

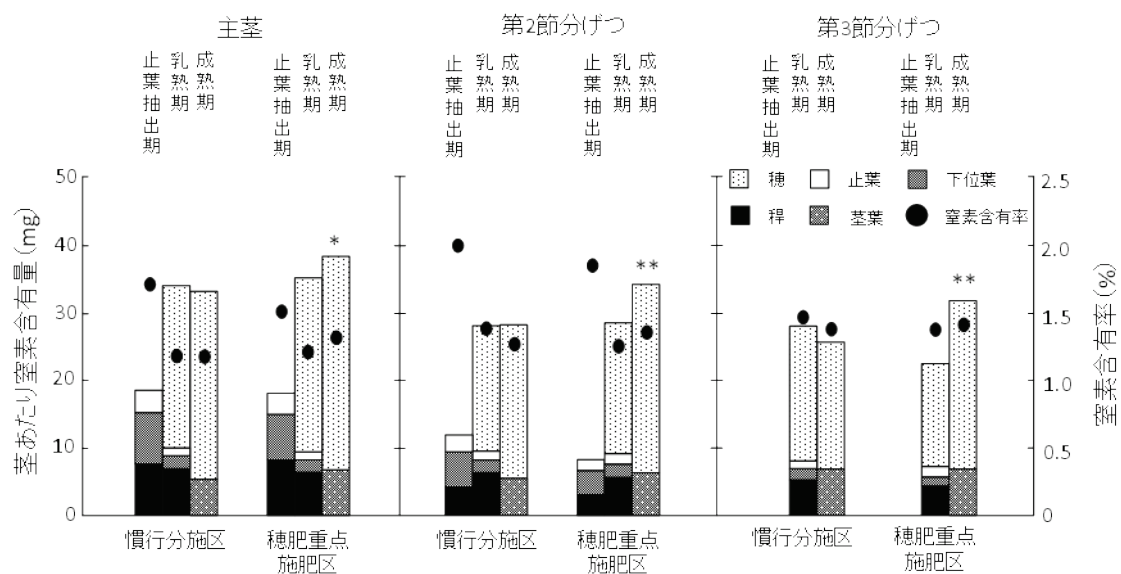
雑草管理：収量を安定的に高めるためには，雑草防除も重要である．本研究を実施した圃場は，山口県ではイタリアンライグラスとトゲミノキツネノボタン，カズノコグサが発生しやすく，熊本県ではスギナが発生しやすかった．雑草が繁茂すると，相互遮蔽や養分競合によって収量が低下することが知られている（Akhtar ら 2000）．山口県の圃場では，2015/16 年から 2017/18 年は雑草防除が不十分であったため，登熟期の日照時間が 5 作期で最も長かった 2016/17 年（第 3-3 表）でも収量が約  $550 \text{ g } \text{m}^{-2}$  であったが（第 3-4 表），2018/19 年は雑草防除を丁寧に行ったため雑草の量が少なく，登熟期の日照時間が平年より長かったため（第 5-4 表）5 作期で最も多収の  $723 \text{ g } \text{m}^{-2}$  となった（第 5-6 表）．熊本県の圃場では，スギナの発生量が多かった 2017/18 年と 2018/19 年は収量と窒素収量が他の作期に比べて少なかった（第 5-5 表）．穂肥重点施肥は，茎立ち期以前

の窒素施肥を抑えているため雑草の生長も抑えられるが、気温が上がり始める 3 月以降に窒素を多投入するため、雑草防除が不十分だと雑草が窒素を吸収し、大きく成長することによって収量の低下や倒伏を助長してしまう。そのため、穂肥重点施肥で栽培する場合でも雑草防除には留意する必要がある。近年では、薬剤耐性をもった雑草も発生しているため、雑草の効率的な防除方法を明らかにしていく必要もあると考えられる。

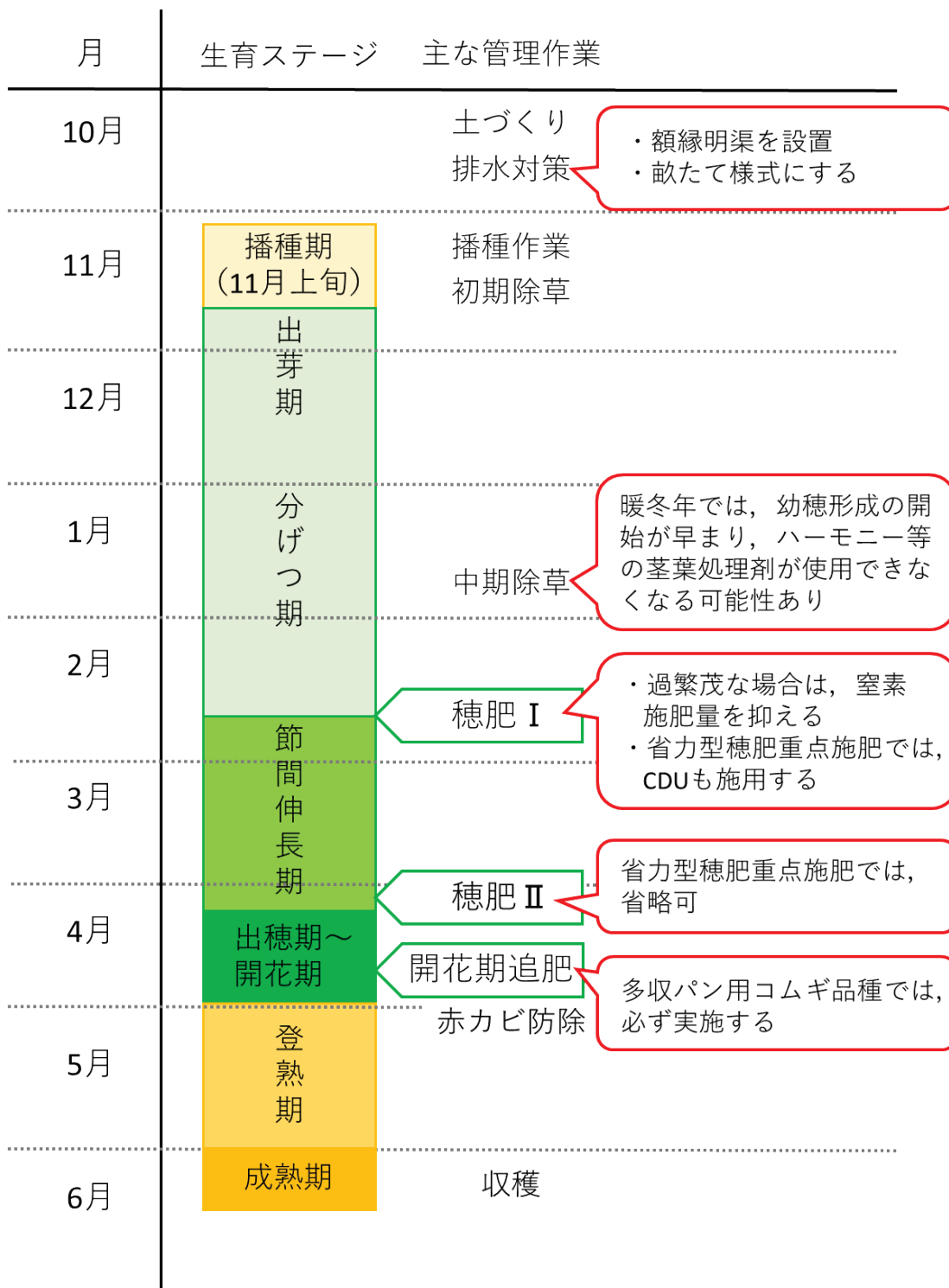
増収する気象条件：穂肥重点施肥の増収程度は、止葉抽出期以降の気象条件によって異なると考えられた。本研究で 5 作期にわたって穂肥重点施肥の効果を検証した結果、穂肥重点施肥は、慣行分施に比べて増収する作期と収量は高まらないが子実タンパク質含有率が高まる作期があった（第 2-3 表，第 3-4 表，第 5-5 表，第 5-6 表）。コムギの収量は、止葉抽出期頃から穂揃い期の受光量が少なくと著しく減少することが報告されている（佐藤ら 1993）。そこで、止葉抽出期から穂揃い期における日照時間の平年値との差と穂肥重点施肥による増収量の相関関係を確認したところ、「せときらら」と「ミナミノカオリ」のいずれも負の相関関係があった（第 7-3 図）。このことから、日照時間が平年より長い作期では慣行分施も多収となるため穂肥重点施肥の増収程度が低くなるのに対し、日照時間が平年値より短い作期では慣行分施の収量は低下しやすいが、穂肥重点施肥はこの時期の NAR や CGR が高く（第 3-6 表）、多収を維持できるため増収

程度が高かったと考えられた。

成熟期：穂肥重点施肥は，成熟期が慣行分施に比べて 2～4 日遅れるが，6 月 3 日以降になることはなかった。生育後期重点施肥は，登熟期間でも葉色を濃く保ち，乾物生産を高く維持することによって収量を高めるが，成熟期が遅れることが指摘されている（渡邊ら 2016）。穂肥重点施肥でも，前述の報告と同様に登熟期間中に葉色が濃く保たれており，慣行分施区と同時期に収穫すると再転流が不十分であった（第 2-2 図）。穂肥重点施肥の生理的成熟日は，本研究を行った 5 作期では慣行分施区に比べて 2～4 日遅れ，最も遅い作期で 6 月 3 日であった。「せときらら」の栽培指針では収穫期を 6 月 5 日頃としており，穂肥重点施肥で栽培することによる成熟日の遅れは問題にならないと考えられた。



第 7-1 図 2015/16 年作期に栽培したミナミノカオリにおける主茎、主茎第 2 節分げつおよび主茎第 3 節分げつの茎あたりの器官別窒素含有量および窒素含有率. 成熟期は葉身と稈を一括して茎葉として測定した. \*, \*\*は、茎全体の窒素含有量が同じ生育ステージの慣行分施肥区に対してそれぞれ 5%, 1%水準で有意差があることを示す.



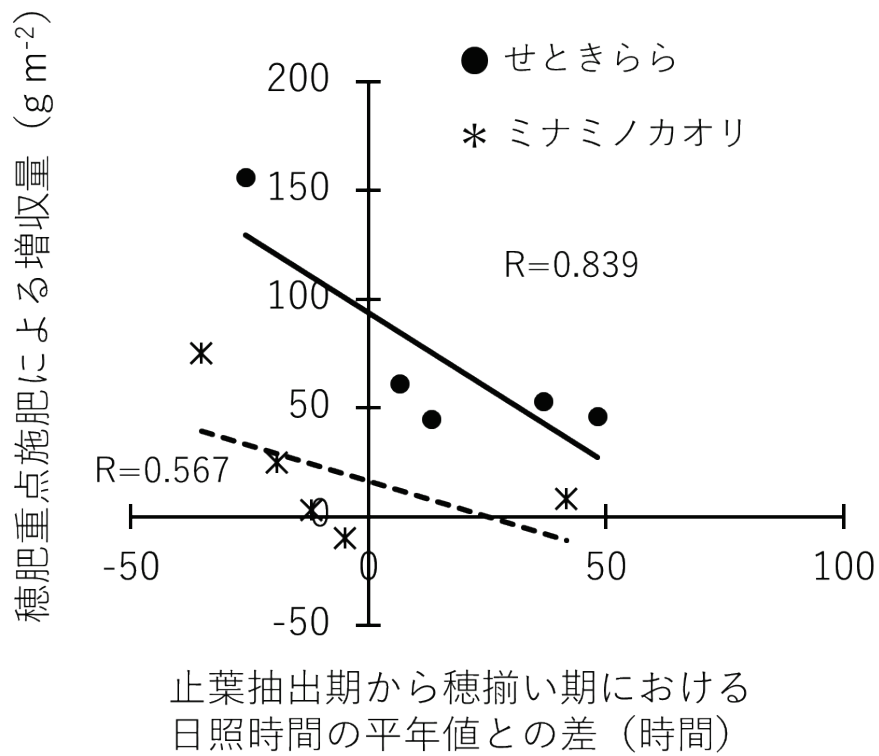
第 7-2 図 穂肥重点施肥で栽培するための栽培暦.

第 7-1 表 2015/16 年作期に基肥として堆肥を施用し, 穂肥重点施肥で栽培したミナミノカオリの収量, 収量構成要素および子実タンパク質含有率 (GPC).

	収量 (g m <sup>-2</sup> )	全乾 物重 (g m <sup>-2</sup> )	収穫 指数 (%)	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	一穂 粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)
堆肥施用区	643	1352	41.7	555	36.8	36.7	13.4
穂肥重点施肥区との差	+36	+40	+1.2	-2	+1.5	+1.0	-0.4
有意差	ns	ns	*	ns	ns	*	ns

\*は, 穂肥重点施肥区と比較して t 検定で 5% 水準の有意差があることを示す.





第 7-2 図 止葉抽出期から穂揃い期における日照時間の平年値との差と穂肥重点施肥による増収量の関係.  
R は、ピアソンの相関係数を示す.

## 要旨

九州・山口地域では、パン用コムギの生産量が増加しているが、反収が低いことが課題となっている。コムギの収量を高めるには、成熟期までに窒素を多く吸収させる必要がある。窒素は、茎立ち期以降の吸収率が高く、この時期に施用することによって穂数が増え、増収することが知られているが、同時に倒伏の危険性も高めてしまう。また、収量が高まると、パン用コムギの品質を評価するにあたってとくに重要な子実タンパク質含有率（GPC）が低下しやすくなる。パン用コムギでは、品質評価のランク区分において GPC の基準値が 11.5～14.0%と定められおり、これを下回ると加工適正が低下する。そのため、パン用コムギの栽培では収量を高めるだけでなく、GPC を高く維持する必要もある。本研究では、パン用コムギの高品質と多収の両立を目的とし、窒素吸収効率が低いとされている基肥と分けつ肥を省略し、その分窒素の吸収効率が高い茎立ち期に分施・増肥する穂肥重点施肥が収量と GPC におよぼす影響を明らかにした。また、穂肥重点施肥で栽培することによって予見される課題の解決についても取り組んだ。

穂肥重点施肥は、九州地方で広く栽培されているパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」の収量を高め、GPC も高く維持した。穂肥重点施肥区の収量は、2015/16 年では慣行分施肥区に比べて穂数が約 100 本  $\text{m}^{-2}$  多くなることによって 15%高まった。穂肥重点施肥区で穂数が多くなった原因は、主茎第 3 節から発生した分けつが慣行分施肥区に比べて約 40 ポイントも多く有効化していたためであった。また、増収したにもかかわらず、GPC は慣行分施肥区と同等以上に高く維持されていた。GPC が高まった原因は、穂肥重点施肥区の成熟期における地上部窒素蓄積量が慣行分施肥区より 3.2 g  $\text{m}^{-2}$  も多かったためであった。

穂肥重点施肥は、山口県で奨励品種となっているパン用コムギ品種「せときらら」でも収量を高め、GPC も高く維持した。窒素施肥がコムギの収量や収量構成要素におよぼす影響は品種によって異なるため、「ミナミノカオリ」に比べて多収となる反面 GPC が低くなりやすい「せときらら」では異なった結果となる可能性があった。しかし、「せときらら」でも穂肥重点施肥区の収量は、穂数が最大で約 200 本  $\text{m}^{-2}$  も多くなることによって 11~40% も増収し、GPC も低下しなかった。

穂肥重点施肥は、倒伏の危険性も低下させた。茎立ち期に多く窒素を追肥する施肥体系は、稈長を伸ばし、倒伏を助長するとされているが、穂肥重点施肥で栽培したコムギは、成熟期の草丈が慣行分施に比べてむしろ短かった。また、穂肥重点施肥に基肥や分けつ肥を増肥したところ、基肥の窒素施肥量が多いほど緑面積指数が高く、倒伏程度も高まった。この結果から、倒伏を助長する直接的な原因は茎立ち期の窒素追肥ではなく、茎立ち期に過繁茂な群落になることによって光競合が起こるためであるとした仮説をたて、検証した。前期重点施肥区は、基肥と分けつ肥を重点的に施用したため茎立ち開始期に緑面積指数や被覆率が高かった。成熟期の倒伏程度は、茎立ち期中に後期重点施肥区の 3 分の 1 しか窒素を追肥していないにもかかわらず、前期重点施肥区で高かった。前期重点施肥区で倒伏程度が高かった原因は、下位の伸長節間長が約 13% 長く、稈の強度と正の相関がある節間 1 cm あたり乾物重が約 11% 軽かったためであった。これらの結果は、茎立ち期に遮光処理を施した区でも同様の結果であった。

穂肥重点施肥の肥効は、肥効調節型肥料を茎立ち開始期に施用することによって省力的に再現できた。本研究の穂肥重点施肥は、尿素を用いた分施体系のため、施肥作業に労力や時間がかかる。施肥作業の省力化には肥効調節型肥

料が有効であるため、穂肥重点施肥の肥効を再現できる肥効調節型肥料の種類や施用時期について検討した。肥効調節型肥料と尿素を茎立ち開始期に施用する施肥体系は、複数の作期において「せときらら」と「ミナミノカオリ」のいずれでも穂肥重点施肥区と同等の収量および地上部窒素蓄積量となった。また、茎立ち開始期以前に窒素を施用していないため、倒伏回避の観点からも分施肥体系の穂肥重点施肥と同等であった。

穂肥重点施肥では、苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確保することによって安定的に多収を達成できると考えられた。穂肥重点施肥は、茎数を増やすために施用する基肥や分げつ肥を省略するため、過湿土壌や高温によって分げつの発生が抑制されると低収となる恐れがある。そこで、人為的に苗立ち不良となる群落を作り、分げつ肥によって茎数を回復させられるか検証したところ、分げつ肥を施用しても茎数は増えず、苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上の区はいずれも収量 500 g  $\text{m}^{-2}$  以上の多収となった。これは、穂肥重点施肥区で栽培したため茎の有効化率が 85%以上と高く、苗立ち不良区でも穂数が減少しなかったためであった。

本研究の結果、穂肥重点施肥は耐倒伏性を高めつつ、パン用コムギの多収と高品質を両立することができる栽培方法であることが明らかとなった。また、肥効調節型肥料を茎立ち開始期に施用することによって省力的に穂肥重点施肥の肥効を再現でき、苗立ち数 80 本  $\text{m}^{-2}$  以上を確保できれば穂肥重点施肥で栽培することによって安定的に多収となることも明らかとなった。

## Summary

In Kyusyu and Yamaguchi region, western side of Japan, the production of wheat cultivars for bread is increasing year by year, although yield of the wheat is lower than that in other regions. To increase the yield of wheat, it is important to increase amount of nitrogen (N) accumulation in aboveground. N top-dressing during stem elongation stage effectively increases N uptake and yield. At the same time, however, it could increase risk of lodging through elongating stem length. In Addition, grain protein content (GPC) which is important quality of wheat for bread could decrease with increase of yield. Consequently, high GPC at high yield level and the managements to achieve it are required in wheat cultivars for bread. The current conventional fertilization in which the N is intensively applied at basal and tillering stages should be modified since N uptake efficiency of those N is not high. The objective of this study was to examine the effects of intensive nitrogen fertilization during stem elongation (INFDSE) to achieve both high yield and high GPC, and to find and solve the potential problems of the INFDSE in wheat plants.

The INFDSE is a fertilizing method that saves N application before stem elongation stage and applies large amount of N during stem elongation stage. In the chapter 2, the effects of INFDSE on yield, yield components and GPC in a bread wheat cultivar “Minaminokaori” were verified in field trials in Kumamoto prefecture. The yield and its GPC of wheat grown by INFDSE were higher than that of wheat grown by the conventional N management. The yield in INFDSE was 15% higher than in conventional N management since spike number per m<sup>2</sup> was 20% higher. The increase of spike number was attributed to the increase of spike-bearing tillers emerged from higher nodes on the

main stem. For instance, 62.2% of third nodes on main stem bore spikes in the INFDSE, while only 19.1% in the conventional N management. The GPC in INFDSE was the same as or more than that in the conventional N management even though the yield in INFDSE was higher. The increase in GPC was attributed to the increased N accumulation in aboveground at maturity. The N accumulation in INFDSE was 3.2 g m<sup>-2</sup> higher than that in conventional N management. The plant height of wheat grown in INFDSE was shorter than that in conventional N management even though 3 to 7.5 times N was applied during stem elongation stage.

In the chapter 3, the effects of INFDSE on a wheat cultivar for bread “Setokirara”, the recommended cultivar in Yamaguchi prefecture, since yield potential and thus risk of low GPC are higher than other cultivars for bread in the western Japan. In this chapter, the modified INFDSE at high N application levels was also tested. The yield of “Setokirara” grown in INFDSE was 11 to 40% greater than that in conventional N management. Increase in spike number accounted for the higher yield as found in the chapter 2. The GPC in INFDSE was not lowered even though the yield was greater than in conventional N management. In the trials of high N application level, the increase of N applied at early stages and increase of total N did not modified the yield and N accumulation in aboveground but increased the lodging degree at maturity.

It is well known that increased N top-dressing during stem elongation stage may increase the risk of lodging by elongating stem length. However, in the chapter 2 and 3, the risk of lodging is not increased by the intensive N application during stem elongation stage while did by the N application before stem elongation stages. In the chapter 4, I verified the hypothesis that lodging is not induced directly by the N application during stem elongation stage but by intensified light competition in the resulting excessively

dense canopy. In the wheat grown in conventional N management, green area index was 81% higher and ratio of canopy coverage on ridge that accounted for green area on a ridge was 18.1 point greater than the plants in INFDSE. At maturity, the lodging degree in conventional N management was heavier than that in INFDSE even though the plants in conventional N management were applied only one-third of N in INFDSE during stem elongation stage. The heavier lodging in conventional N management can be responsible for 13% longer internode length in basal stem and 11% lighter internode dry weight per unit length than those in INFDSE. Similar responses of those internode in the conventional N management were found in the plants shaded during stem elongation stage, leading to the conclusion that heavier lodging induced by the intensive N application during stem elongation stage is responsible for light competition despite quick growth induced by intensive N application itself, the extent of lodging can be reduced through controlling canopy to optimal size before stem elongation stage.

The controlled-release fertilizers were effective to reduce labor time and cost for wheat cultivation. In the chapter 5, several controlled-release fertilizers and their application timing were tested to reproduce the effects of INFDSE on yield and GPC. In Kumamoto prefecture and Yamaguchi prefecture using “Minaminokaori” and “Setokirara”, respectively, the crotonylidenediurea (CDU), isobutylidenediurea or coated urea were one-shot top-dressed at basal, tillering stage or initiation of stem elongation stage. In both wheat cultivars, the N application method in which urea and CDU are top-dressed at the initiation of stem elongation stage achieved the same level of yield and N accumulation in aboveground with the plants grown by INFDSE. In the trial in 2018/19 at Kumamoto prefecture, heavy lodging was found in the conventional N management and one-shot top-dressing with coated urea at basal, although lodging was not at all found

in one-shot top-dressing with CDU at the initiation of stem elongation stage. In the one-shot top-dressing with CDU, stem and basal internodes were shorter because N was not applied before stem elongation stage thus the ratio of canopy coverage on ridge was small as in the INFDSE.

One of the potential shortcomings of INFDSE is scarce tiller number due to poor seedling establishment and low emergence of tillers, in particular when tiller emergence is inhibited by heavily moist soil and/or higher temperature in winter which brings about short vegetative growth. In the chapter 6, N-controlled fertilization based on growth diagnosis at tillering stage was tested in wheat plants of which seedling number per unit area was low. This trial was done in Yamaguchi prefecture with using “Setokirara”. The establishment in low seedling density induced by low sowing density was approximately 80 plants per  $\text{m}^2$  which was 66% plants stand at standard sowing rates. However, the yield of plants at low seedling density achieved the normal level at more than  $500 \text{ g m}^{-2}$  because more than 85% tillers which emerged before the initiation of stem elongation stage became spike-bearing tillers. On the other hand, the N top-dressing at tillering stage was not effective to increase tiller number per  $\text{m}^2$  indicating that the N top-dressing at tillering stage could not compensate the reduced tiller number induced by low seedling density.

The conclusions of this study are summarized as below:

1. The INFDSE is an effective N application method in wheat for bread. It increases yield and/or GPC due to increase in N accumulation in aboveground and lowers the risk of lodging.
2. The light competition during stem elongation stage is a major factor to increase risk of lodging by elongating basal internode length and decreasing internode dry weight per unit length. Therefore, to intensive N application, control of canopy size before



stem elongation stage is important to enhance lodging resistance.

3. The controlled-release fertilizers top-dressed at the initiation of stem elongation stage can reproduce the effects of INFDSE. The modified INFDSE using controlled-release fertilizers, in particular one-shot top-dressing with urea and CDU at the initiation of stem elongation stage, will be effective to reduce labor cost and time.
4. To achieve stable high yield in “Setokirara” grown by the INFDSE, ensuring seedling establishment more than 80 seedlings per m<sup>2</sup> is important. The growth diagnosis seemed not effective and unnecessary since tiller number could not be controlled by top-dressing before stem elongation stage.

## 謝辞

本論文を学位論文として提出するにあたり，山口大学農学部教授 荒木英樹博士には本研究のテーマ設定，実験計画の作成，データの解析手法や論文のとりまとめだけでなく，研究者としての考え方についてまで懇切丁寧なご指導，ご鞭撻を賜りました．この場を借りてお礼申し上げます．また，山口大学農学部教授 高橋肇博士，九州沖縄農業研究センター 中村和弘博士，北海道農業研究センター松中仁博士，龍谷大学文学部准教授 丹野研一博士には，研究遂行にあたり貴重なご指導，ご助言を賜りました．心より感謝申し上げます．

圃場試験を遂行するにあたって，山口大学農学部附属農場 長砂光治氏ならびに高田暁氏にコムギの栽培管理をはじめ多くのご支援，ご協力をいただきました．深く感謝申し上げます．さらに，圃場管理およびデータ収集にあたっては同研究室の後輩諸氏にご協力いただきました．ここに記して厚く感謝申し上げます．

- Abichou, M., Solan, B. and Andriew, B. 2019. Architectural Response of Wheat Cultivars to Row Spacing Reveals Altered Perception of Plant Density. *Front. Plant Sci.* 10: 1-14.
- AHDB. 2009. 冬小麦経営指針  
<https://cereals.ahdb.org.uk/media/180204/g48-nitrogen-for-winter-wheat-management-guidelines.pdf> (2017/1/23 閲覧)
- Akhtar, M., Mehmood, A., Ahmad, J. and Iqbal, K. 2000. Nitrogen Uptake Efficiency in Wheat (*Triticum aestivum* L.) as Influenced by Nitrogen Level and Weed-crop Competition Duration. *Pak. J. Biol. Sci* 3: 1002-1003.
- Andersson, A., Johansson, E. and Oscarson, P. 2005. Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat. *Plant Soil* 269: 321-332.
- Berry, M. P. and Spink J. 2012. Predicting yield losses caused by lodging in wheat. *Field Crops Res.* 137: 19-26.
- Büchi, J., Charles, R., Schneider, D., Sinaj, S., Maltas, A. 2016. Performance of eleven winter wheat varieties in a long term experiment on mineral nitrogen and organic fertilization. *Field Crops Res.* 191: 111-122.
- Chen, X., Wang, J, Wang, Z., Li, W., Wang, C., Yan, S., Li, H., Zhang, A., Tang, Z. and Wei, M. 2018. Optimized nitrogen fertilizer application mode increased culms lignin accumulation and lodging resistance in culms of winter wheat. *Field Crops Res.* 228: 31-38.
- Cui, Z., Zhang, F., Chen, X., Dou, Z., Li, J. 2010. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: Maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context. *Field Crops Res.* 116: 140-146.
- Dong, C., Fu, Y., Liu, G. and Liu, H. 2014. Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations. *J. Agron. Crop Sci.* 200: 219-230.
- 江口久夫・平野寿助・吉田博哉 1969. 暖地におけるコムギの良質化栽培に関する研究 (第2報) 3要素施用量および窒素の施用時期・施用法と品質との関

- 係. 中国農試研報 A17: 81-111.
- 遠藤悦雄 1985. 小麦タンパク (1) -調理, 加工上の小麦タンパクの性質-. 調理科学 18: 38-49.
- FAOSTAT 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (2020/11/19 閲覧).
- Fischer, A. R. and Stapper, M. 1987. Lodging effects on high-yielding crops of irrigated semidwarf wheat. Field Crops Res. 17: 245-258.
- Flowers, M., Weisz, R. and Heiniger, R. 2001. Remote sensing of winter wheat tiller density for early nitrogen application decisions. Agron. J. 93: 783-789.
- 藤澤英司・小林新・羽生友治 1998. 被覆肥料の溶出速度に及ぼす土壌水分の影響. 土肥誌 69: 582-589.
- 藤田雅也・河田尚之・関昌子・八田浩一・波多野哲也・田谷省三・佐々木昭博・氏原和人・谷口義則・平将人・塔野岡卓司・堤忠宏・坂智広 2009. 製パン適性の良い硬質小麦新品種「ミナミノカオリ」の育成. 九州沖縄農研報告 51: 41-64.
- 藤吉正記 1953. 小麦と裸麦に於ける秋播性程度及び播種期と生育-収量との関係について. 九州農試彙報 1: 375-406.
- 福嶋陽・楠田幸・古畑昌己 2001. 基肥の省略が早播きした秋播性コムギ「イワイノダイチ」の生育および収量に及ぼす影響. 日作九支報 67: 28-31.
- 福嶋陽・楠田幸・古畑昌己 2004. 播種量および施肥法がコムギ品種「チクゴイズミ」の稈長・収量・原麦の蛋白質含量に及ぼす影響. 日作九支報 70: 23-25.
- Guertal, A.E. 2009. Slow-release nitrogen fertilizers in vegetable production: a review. HortTechnology. 19: 16-19.
- Guo, Z. and Schnurbusch, T. 2015. Variation of floret fertility in hexaploidy wheat revealed by tiller removal. J Exp. Bot. 66: 5945-5948.
- 原圭祐・須田達也・渡部敢 2015. センサベース可変施肥のコムギ生産における評価. 農業食料工学会誌 77: 485-493.
- 林邦広 2015. リアルタイム可変施肥を実現したレーザ式生育センサ. 農業食料工学会誌 77: 13-16.

- 広田雄二 2013. 日本作物学会九州支部会編, 作物調査基準 初版第1刷. 日本作物学会九州支部. 10.
- Hitz, K., Clark, A. J. and Sanford, D. A. V. 2017. Identifying nitrogen-use efficient soft red winter wheat lines in high and low nitrogen environments. *Field Crops Res.* 200: 1-9.
- Hussain, I., Khan, A. M. and Ahmad, K. 2003. Effect of Row Spacing on the Grain Yield and the Yield Component of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Agronomy* 2: 153-159.
- Hussain, M., Mehmood, Z., Khan, B. M., Farooq, S., Lee, D. and Farooq, M. 2012. Narrow Row Spacing Ensures Higher Productivity of Low Tillering Wheat Cultivars. *Int. J. of Agric. Biol.* 14: 413-418.
- 稲村達也・吉川茜・松本憲悟・池永幸子・井上博茂・山末祐二 2007. コムギ収量の圃場内変動をもたらす要因の解析と可変量管理の可能性. *日作紀* 76: 189-197.
- 石丸知道・荒木雅登・荒木卓哉・山本富三 2015. 適正子実タンパク質含有率からみた中華めん用コムギ品種「ちくし W2 号」の穂揃期後の窒素追肥時期. *日作紀* 84: 155-161.
- 石丸知道・荒木雅登・荒木卓哉・山本富三 2016. 中華めん用コムギ品種「ちくし W2 号」の子実タンパク質含有量における施肥窒素の利用率と地力窒素の寄与率. *日作紀* 85: 385-390.
- 岩渕哲也・田中浩平・松江勇次・松中仁・山口末次 2007. 開花期の窒素追肥がパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」と「ニシノカオリ」の製粉性, 生地 of 物性および製パン適性に及ぼす影響. *日作紀* 76: 37-44.
- 岩渕哲也・浜地勇次・宮崎真行・内川修 2011. 近年の北部九州産コムギにおける子実タンパク質含有率低下の要因解析. *日作紀* 80: 59-64.
- 鎌田英一郎・高橋肇・池尻明彦・内山亜希・金子和彦・松永雅志・荒木英樹・丹野研一 2016. 穂肥窒素の増施が裸麦の登熟期間中の物質生産および窒素代謝に及ぼす影響. *日作紀* 85: 288-293.
- 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.
- Ma, S., Wang, T., Guan, X. and Zhang, X. 2018. Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter

- wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot. *Field Crops Res.* 221: 166-174.
- 松谷瑛・猪野雅哉 2017. 麦作期間中における緩効性肥料の溶出の予測方法. 石川県農林水産研究成果集報 19: 22.
- 松山宏美・島崎由美・大下泰生・渡邊好昭 2014. コムギの耐倒伏性の品種間差とその要因. *日作紀* 83: 136-142.
- Meng, Q., Yue, S., Chen, X., Cui, Z., Ye, Y., Ma, W., Tong, Y., Zhang, F., 2013. Understanding Dry Matter and Nitrogen Accumulation with Time-Course for High-Yielding Wheat Production in China. *PLOS ONE* 8: 1-9.
- 森崎耕平・山下有希・平岩確・黒野綾子・遠山孝通・池田彰弘 2018. 愛知県における2016年産及び2017年産コムギの凍霜害発生の実態と発生要因の推定. *愛知県農総試研報* 50: 63-66.
- 村田資治・内山亜希・池尻明彦・原田夏子 2017. パン用コムギ品種「せときらら」における被覆尿素肥料の穂肥同時施用による子実タンパク質含有率の向上. *日作紀* 86: 382-387.
- Mulder, E. G. 1954. Effect of mineral nutrition on lodging of cereals. *Plant Soil.* 5: 246-306.
- 中司祐典・木村晃司・有吉真知子 2010. 緩効性肥料を利用した小麦「ニシノカオリ」における施肥の効率化. *山口農林総合技術センター研究報告* 1: 56-70.
- Nardi, P., Neri, U., Dimatteo, G., Trinchera, A., Napoli, R., Farnia, R., Subbarao, V.G. and Benedetti, A. 2018. Nitrogen release from slow-release fertilizers in soils with different microbial activities. *Pedosphere* 28: 332-340.
- Noureldin, N. A., Saady, H. S., Ashmawy, F. and Saed, H. M. 2013. Grain yield response index of bread wheat cultivars as influenced by nitrogen levels. *Annals Agric. Sci.* 58: 147-152.
- 農林水産省 2012. 平成23年度 食料・農業・農村白書 第1章 食料自給率の向上 (2) 食料自給率の向上に向けた取組 ウ コムギ.
- 農林水産省 2019. 麦の需給と価格について. 麦の参考統計表.  
[https://www.maff.go.jp/j/seisan/boueeki/mugi\\_zyukyuu/](https://www.maff.go.jp/j/seisan/boueeki/mugi_zyukyuu/) (2020/2/25 閲覧)

- 農林水産省 2020a. 令和元年度食料自給率について.  
[https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu\\_ritu/attach/pdf/012-16.pdf](https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/012-16.pdf)  
(2020/11/19 閲覧).
- 農林水産省 2020b. 作物統計調査. 作況調査. 平成 30 年産小麦.  
[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou\\_kome/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html)  
1 (2020/2/25 閲覧)
- 農林水産省 2020c. 麦類の農産物検査結果.  
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/mugi/index.html> (2020/11/19  
閲覧)
- 農林水産省 2020d. 新潟県における土づくりのすすめ方. 6-2 緩効性肥料の利用技術 (肥効調節型肥料).
- 荻内謙吾・作山一夫 2005. 秋播性コムギの冬季播種栽培における好適窒素施肥法. 日作紀 74: 17-22.
- 及川一也 1996. 岩手県におけるコムギ主要品種の生育・収量及び品質に及ぼす窒素追肥及び播種量の影響. 東北農試研究資料 19: 5-15.
- 大山卓爾 1990. 植物栄養実験法編集委員会編, 植物栄養実験法 第4刷. 博友社, 東京. 174-177.
- 尾和尚人・三井進午 1974. CDU, IB, M2U の加水分解について. 土肥誌. 45: 53-58.
- 小柳敦史 2008. 茨城県稲敷市の大区画水田でみられた 2007 年産コムギにおける圃場内の生育ムラと土壌の凹凸及び土壌水分との関係ー湿害の発生様相ー. 日作紀 77: 511-515.
- Pinthus, M. J. 1973. Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. Adv. Agron. 25: 209-263.
- Piñera-Chavez, J. F., Berry, M. P., Foulkes, J. M., Jesson, A. M. and Reynolds, P. M. 2016. Avoiding lodging in irrigated spring wheat. I. Stem and root structural requirements. Field Crops Res. 196: 325-336.
- Pinthus, M. J. 1973. Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. Adv. Agron. 25: 209-263.
- Rawluk, C. D. L., Racz, G. J. and Grant, C. A. 2000. Uptake of foliar or soil application of  $^{15}\text{N}$ -labelled urea solution at anthesis and its

- affect on wheat grain yield and protein. *Can. J. Plant Sci.* 80: 331-334.
- Robertson, D., Zhang, H., Palta, A. J., Colmer, T. and Turner, C. N. 2009. Waterlogging affects the growth, development of tillers, and yield of wheat through a severe, but transient, N deficiency. *Crop Pasture Sci.* 60: 578-586.
- 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: 12-16.
- 佐藤暁子・末永一博・川口藪美 1993. コムギの穂数及び穂の諸形質に及ぼす時期別遮光処理の影響. *日作紀* 62: 206-210.
- 佐藤暁子・小綿美環子・中村信吾・渡辺満 1999. コムギの製パン適性に及ぼす窒素追肥時期の影響. *日作紀* 68: 217-223.
- 関根久子・梅本雅 2015. 小麦収量水準格差の形成要因ー日本とドイツの比較分析ー. *中央農研研報* 24: 31-54.
- Sharma, P.D. and Swarup A. 1988. Effects of short-term flooding on growth, yield and mineral composition of wheat on sodic soil under field conditions. *Plant Soil* 107: 137-143.
- 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.
- Suzuki, S., Suzuki, Y., Yamamoto, N., Hattori, T., Sakamoto, M. and Umezawa, T. 2009. High-throughput determination of thioglycolic acid lignin from rice. *Plant Biotech.* 26: 337-340.
- 高田兼則・谷中美貴子・石川直幸・池田達哉・船附雅子. 2017. 製パン性に優れ多収の硬質小麦新品種「せときらら」の育成. *西日本農研報* 17: 13-30.
- 高橋肇・張立・松澤智彦・藤本香奈・山口真司・Md. Alamgir Hossain・荒木英樹 2010. 山口県で早播栽培した秋播性程度がⅢ～Ⅴのコムギ品種の収量性に対する幼穂形成期間における窒素追肥処理の効果. *日作紀* 79: 468-475.
- 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.
- 竹内実・近乗偉夫・吉良知彦 2006. 醤油醸造用硬質コムギの高タンパク質化へ向けた施肥法について. *日作九支報* 72: 25-28.



- Tamaki, M., Ashraf, M., Imai, K. and Moss, N.D. 1999. Water and nitrogen effects on the growth and yield of spring wheat. *Environ. Control in Biol.* 37: 143-151.
- 田中浩平・宮崎真行・内川修 2008. 肥効調節型肥料を利用したコムギの省力追肥法. *日作九支報* 74: 36-38.
- Tanaka, T.S.T., Kono Y. and Matsui T. 2019. Assessing the spatial variability of winter wheat yield in large-scale paddy fields of Japan using structural equation modelling. *Precis. Agric.* '19: 751-757.
- 田谷省三 1993. 暖地における早生コムギ品種の収量性に関する育種学的研究. *九州農試報告* 27: 333-398.
- Tigabu, R. and Asfaw, F. 2016. Effects of Seed Rate and Row Spacing on Yield and Yield Components of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Dalbo Awtaru Woreda, Wolaita Zone, Southern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 6: 58-67.
- 鳥山和伸 2008. 非破壊的手法による作物栄養診断の最前線 1. 水稻：リモートセンシングによる窒素栄養診断. *土肥誌* 80: 66-74.
- 豊田正範・小林洋介・三好祐介・安村直子・楠谷彰人・浅沼興一郎 2004. 播種期によるコムギ主茎の葉，小穂および小花の分化数成立過程の変異. *日作紀* 73: 10-17.
- 土谷大輔 2012. 硬質小麦品種「ミナミノカオリ」の収量向上および子実タンパク質含有率制御技術. *長崎農林技セ研報* 3: 13-26.
- 浦野光一郎・保科亨 2012. 肥効調節型肥料の全量基肥播種溝施用が小麦の生育，収量および品質に及ぼす影響. *日作紀* 81 (別 2): 202-203.
- 浦野光一郎 2014. 硫安の全量 3 月上旬施肥が六条大麦の生育，収量および品質に及ぼす影響. *日作中国支研集* 54: 29-30.
- 和田道弘 2002. 日本作物学会編，作物学事典 初版第 1 刷. 朝倉書店，東京. 339.
- 脇山恭行 2005. 植生指数と水稻の籾数の関係. *農業気象* 61: 61-67.
- 渡邊和洋・中園江・中村大輔・西谷友寛・西村奈月・松島弘明・谷尾昌彦・江原宏 2016. 生育後期重点施肥がコムギの生育と収量に及ぼす影響. *日作紀* 85: 373-384.
- Webster, J. R. and Jackson, L. F. 1993. Management practices to reduce

- lodging and maximize grain yield and protein content of fall-sown irrigated hard red spring wheat. *Field Crops Res.* 33: 249-259.
- Xiao, Y., Liu, J., Li, H., Cao, X., Xia, X. and He, Z. 2015. Lodging resistance and yield potential of winter wheat: effect of planting density and genotype. *Front. Agr. Sci. Eng.* 2: 168-178.
- Zadoks, C. J., Chang, T. T. and Konzak, F. C. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.
- Zhang, W., Wu, L., Ding, Y., Weng, F., Wu, X., Li, G., Liu, Z., Tang, S., Ding, C. and Wang, S. 2016. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to decrease culm physical strength by reducing structural carbohydrate content in japonica rice. *J. Integrative Agric.* 15: 992-1004.
- Zheng, C., Zhu, Y., Zhu, H., Kang, G., Guo, T. and Wang C. 2014. Floret development and grain setting characteristics in winter wheat in response to pre-anthesis application of 6-benzylaminopurine. *Field Crops Res.* 169: 70-76.
- Zheng, M., Chen, J., Shi, Y., Li, Y., Yin, Y., Yang, D., Luo, Y., Pang, D., Xu, X., Li, W., Ni, J., Wang, Y., Wang, Z. and Li, Y. 2017. Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat. *Sci. Rep.* 7: 41805.

## 学会公表論文のリスト

### 第2章

題目:パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における穂肥重点施肥が収量や子実タンパク質含有率におよぼす影響

著者名:水田圭祐・荒木英樹・中村和弘・松中仁・丹野研一・高橋肇

学術雑誌名 巻・号・頁:日本作物学会紀事 86 (4): 319-328  
(DOI: 10.1626/jcs.86.319)

### 第3章

題目:穂肥重点施肥による多収パン用品種「せときらら」の高品質多収化

著者名:水田圭祐・荒木英樹・高橋肇

学術雑誌名 巻・号・頁:日本作物学会紀事 88 (2): 98-107  
(DOI: 10.1626/jcs.88.98)

### 第4章

題目:Shifting timing of intensive nitrogen topdressing later to the stem-elongation phase reduced lower internodes length and lodging risk of wheat

著者名: Mizuta, K., Araki, H. and Takahashi, T.

学術雑誌名 巻・号・頁:Plant Production Science 23 (4): 427-435  
(DOI: 10.1080/1343943X.2020.1752111)

### 第5章

題目:肥効調節型肥料を用いた穂肥重点施肥がパン用コムギの収量と子実タンパク質含有率におよぼす影響

著者名:水田圭祐・荒木英樹・中村和弘・松中仁・高橋肇

学術雑誌名 巻・号・頁:日本作物学会紀事 90 (1): 18-28

## 第6章

題目：パン用コムギ品種「せときらら」における茎数を指標とした生育診断に基づく可変施肥法の検証

著者名：水田圭祐・荒木英樹・高橋肇

学術雑誌名 巻・号・頁：日本作物学会紀事 89 (4)：299-306