

地力および施肥に由来する窒素の吸収動態の解明に基づいた省力施肥法による
高品質麦類生産に関する栽培学的研究

2024年

石丸 知道

目次

第1章 緒言	3
第2章 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率における施肥窒素の利用率と地力窒素の寄与率	5
第3章 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	13
第4章 中華めん用コムギ「ちくしW2号」において高い子実タンパク質含有率を確保し、穂肥と穂揃期追肥を省略できる省力施肥法	22
第5章 食糧用二条オオムギ「はるか二条」における施肥窒素利用率および地力窒素の寄与率	31
第6章 食糧用二条オオムギにおける肥効調節型肥料を活用した穂肥が省略できる省力施肥法	38
第7章 総合考察	45
謝辞	50
公表済み文献	50
引用文献	51
論文要旨	55

第1章 緒言

ムギ類は、我が国において、水田作地帯における転作作物、北関東や北部九州等の水田営農における二毛作作物、北海道の大規模畑作営農における輪作作物として作付けされ、土地利用型農業の重要な作物である。また、「主要食糧の需給及び価格の安定に関する法律」のなかでは、麦類を米穀と並べて主要食糧として位置付けており、国内の作物別作付面積は、水稻に次ぐ。その一方で、国内の麦需要量は海外からの輸入に依存しており、麦類の食料自給率は、オオムギ、コムギとも10%程度（農林水産省 2022）とかなり低い状況である。このため、国は食糧自給率の向上対策として2000年に「麦本作化」と称し、作付面積の拡大による安定供給対策を打ち出し、2020年に策定した食料・農業・農村基本計画では、2030年の麦類の生産努力目標を、コムギで108万トン、オオムギで23万トンに設定している。この目標値を達成するためには、多収品種の育成や栽培法の改善による単収の向上のみならず、作付面積の拡大が不可欠である。

現在、麦作付農家数が減少している状況下において、作付面積の拡大のためには、規模拡大に伴う作業時間の削減を図ることが肝要であり、耕起や播種、防除、収穫といった機械作業は、農業機械の大型化がすすみ、労働時間が削減されている。しかし、施用時期や施用量により、ムギ類の生育や収量および子実タンパク質含有率等の品質に多大な影響を及ぼす施肥管理における追肥作業の省力化は図られていない。したがって、生産現場からは省力生産技術の開発の一環として、高品質省力施肥法の開発が求められている。

特に、麦類は米と異なり最終的に加工品として消費されることから、加工用途に対応した高品質で商品価値の高い麦類の生産が実需者から求められている。高品質麦類生産においては、2004年に加工用途別の品質評価基準が導入され（農林水産省 2006）、品質評価基準別に直接支払交付金の単価が決められている。麦作農家への直接支払交付金は、加工用途別の評価基準に応じて支払われるため、高品質麦類の生産は実需者のみならず麦作農家経営にとっても重要である。

これまで、高品質麦類の生産および省力施肥法に関する研究は、コムギの子実タンパク質含有率を高めるための窒素施肥法（Cassmanら 1992, 佐藤ら 1999, 高山ら 2004, 山下ら 2005, 竹内ら 2006, Nakanoら 2008, 田中ら 2008, 佐藤ら 2009, 島崎ら 2013, 2014）、オオムギの高品質麦生産に関する施肥法（菅ら 1962, 久保田ら 1991, 水上・小林 1993, 塔野岡ら 2010）、肥効調節型肥料を活用した施用法（田中ら 2008, 中司ら 2010, 村田ら 2017）等がある。これらの報告は、いずれも栽培法とムギ類の生育および収量、品質を検討した内容で、地力および施肥に由来する窒素のムギ植物体中における吸収動態に基づいた省力施肥体系を前提とする高品質麦類生産技術については未検討である。また、ムギ植物体中における施肥に由来する窒素の吸収動態に関する研究がある（三好ら 1993, 上野・田谷 1998, 木村ら 2001）が、分施栽培における施用窒素の吸収に関する報告であり、省力施肥体系を前提とする高品質麦類生産技術に寄与する知見としては不十分である。

省力施肥体系を前提とした高品質麦類の安定生産技術を確立するためには、ムギ植物体中における窒素の吸収動態を土壌由来窒素と施肥窒素の両面から論ずることが重要と考

える。なぜならば、土壌の違いにより地力からの窒素供給時期が異なる（谷内・田谷 1987）こと、追肥回数の削減には肥効調節型肥料を施用することから、施肥ごとの窒素利用率および土壌に由来する窒素の吸収量を明らかにし、ムギ植物体中に吸収された窒素の由来および動態を把握することが必須であり、その根拠をもとに、理論的に省力施肥体系を検討することが重要となる。しかしながら、施肥窒素と土壌由来窒素両面からムギ植物体の窒素吸収動態を明らかにした報告については、北海道の畑作黒ボク土壌での報告（新良・西宗 1998）のみであり、水田作ムギ類での検討はなされていない。

本研究は、上述した背景と観点から、水田作ムギ類の省力施肥法による高品質安定栽培技術を確立するために、硬質コムギおよび食糧用オオムギの窒素吸収動態を地力および施肥に由来する窒素吸収動態から解明、議論し、省力施肥体系による高品質麦類生産のための理論的根拠を示したものである。解明した概要は、以下のとおりである。

まず、硬質コムギの高品質生産のためには、効率的な窒素供給が重要と考え、コムギの窒素吸収動態を把握し、分施体系における各施肥の施肥窒素利用率と地力の窒素寄与率を解明した（第2章）。また、省力施肥法において適正な子実タンパク質含有率を確保できる肥効調節型肥料を選定する目的で、分施体系の効果的な穂揃期追肥の施用期間を検証した（第3章）。次いで、第2章および第3章にとりまとめた知見をもとに、肥効調節型肥料としてシグモイド型20日タイプを選定し、イソブチルアルデヒド縮合尿素および速効性肥料との配合肥料を開発し、開発した配合肥料を用いた追肥1回の省力施肥で、慣行の追肥3回体系と同等の収量、適正子実タンパク質含有率を確保できることを実証した（第4章）。一方、食糧用オオムギについても効率的な省力施肥体系を構築するために、分施体系における窒素吸収動態を把握し、各施肥の施肥窒素利用率と地力の窒素寄与率を解明した（第5章）。さらに、第5章に示す知見をもとに、肥効調節型肥料としてリニア型20日タイプを選定し、イソブチルアルデヒド縮合尿素および速効性肥料との配合肥料を開発し、開発した配合肥料を用いた追肥1回の省力施肥によって、慣行の追肥2回体系と同等の収量、精麦品質が得られることを実証した（第6章）。最後に上述の結果をもとに、総合考察を行い、水田作ムギ類の高品質安定生産技術に関して、実現可能な方策を提言した（第7章）。

本研究は、著者が2010～2018年にかけて福岡県農林業総合試験場豊前分場野菜水田作チーム（福岡県行橋西泉）で行われたムギ類の高品質省力栽培技術の確立に関する研究の一環として、ラーメン用コムギ「ちくしW2号」の効率的施肥法の確立、麦類の増産に向けた多収品種の安定栽培法および低収田の改善技術の確立の試験で行ったものである。

本研究は、逐次日本作物学会記事（石丸ら 2015・2016・2021, 石丸・荒木 2022・2023）に報告してきたが、ここに体系的に大要を取りまとめて報告するものである。

第2章 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率における施肥窒素の利用率と地力窒素の寄与率

国内における麦類の主産地である北部九州では、近年、中華めん・パン用コムギ（硬質コムギ）の作付面積が増加している。これは、日本めん用の需要が飽和状態にあり、中華めん・パン用への新規需要開拓によりコムギの需要拡大を図るため、パン用コムギ品種「ニシノカオリ」（田谷ら 2003）や「ミナミノカオリ」（藤田ら 2009）、中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」（古庄ら 2009）が育成されたことによる。一方、国は実需者の望む高品質麦を生産するために、2004年播から品質評価基準を導入した。品質評価基準のランク区分における硬質コムギの子実タンパク質含有率の基準値は、11.5～14.0%である。この水準を確保するため、福岡県では硬質コムギの施肥体系は、基肥+分けつ肥+穂肥に加えて、さらに穂揃期追肥を実施している（田中 2014）。中華めん用コムギ「ちくしW2号」については、「福岡県ラーメン用小麦品種開発協議会」におけるラーメン官能評価試験の結果、ラーメン適性の面から子実タンパク質含有率は12%以上の確保が実需者から求められている（古庄ら 2013）。このため、福岡県では穂揃期追肥の施肥窒素量を10 a当たり5 kgに設定している（福岡県農林水産部経営技術支援課 2018）。しかし、穂揃期追肥の作業は、背負式動力散布機を背負い圃場内に入って施肥するため生産者にとって重労働であり、追肥作業の省力化が要望されている（田中 2013, 村田ら 2017）。実需者および生産者からの要望に応える高品質省力施肥法を構築するためには、コムギ植物体中の窒素動態を把握し、施肥窒素ならびに地力から発現される窒素の子実への集積を明らかにする必要がある。

本章では、 ^{15}N 標識硫酸を用いて、高品質省力施肥体系を構築するため、コムギ植物体中の窒素動態ならびに子実窒素含有量における施肥窒素の利用率と施肥および地力窒素の寄与率を明らかにした。

材料と方法

1. 耕種概要

「ちくしW2号」を供試し、2011年と2012年（播種年、以下同じ）に福岡県農業総合試験場豊前分場の水田圃場（水稲後作、全窒素含有率 0.17%、全炭素含有率 1.87%）において実施した。播種方法は畝幅150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150 本 m^{-2} とした。試験の規模は1区0.15 m^{-2} の2反復で、2011年播は11月28日に、2012年播は11月21日にそれぞれ播種した。施肥および施肥量は両年ともに基肥（播種直後施肥）5 g m^{-2} 、分けつ肥（分けつ期、1月下旬施肥）4 g m^{-2} 、穂肥（節間伸長期、3月上旬施肥）2 g m^{-2} 、穂揃期追肥（2011年播は出穂期後3日、2012年播は出穂期後2日に施肥）5 g m^{-2} とした。また、各区とも基肥時に P_2O_5 、 K_2O を成分量で5 g m^{-2} 施肥した。踏圧および土入れは1月～3月にそれぞれ2回行った。

2. 窒素寄与率

施肥ごとに ^{15}N 標識硫酸（5 atom%）を供試し、対照としてすべての施肥で非標識硫酸を

処理する区を設けた。登熟初期（穂揃期追肥後7日）、登熟中期（穂揃期追肥後21日）、登熟後期（成熟期）に試験区の全株を抜き取り、根を切除後、登熟初期と登熟中期は茎葉と穂の部分に分けて、登熟後期は茎葉（穂軸を含む）と子実の部分に分けて105℃で24時間通風乾燥し、乾物重測定後、粉碎し、窒素分析に供した。¹⁵N濃度（atom% excess）は、安定同位体質量分析計（Integra CN, Sercon）により測定した¹⁵N存在比（atom%）より自然存在比0.366を減じることで、器官、生育期ごとに算出した。各施肥の窒素寄与率は、算出した試料の¹⁵N濃度（atom% excess）を¹⁵N標識硫酸から自然存在比を減じた値で除し、100を乗じて算出した。なお、本試験においては施肥した肥料以外の吸収窒素を地力窒素とした。

3. 窒素含有量および施肥窒素利用率

セミ・マイクロケルダール法にてコムギ植物体の全窒素含有率を測定し、これに乾物重を乗じることで窒素含有量を算出した。算出した窒素含有量に窒素寄与率を乗じて各施肥由来の窒素含有量を算出し、これらを施肥ごとの窒素施用量で除し、100を乗じて窒素利用率を算出した。窒素構成比は、各時期における茎葉、穂あるいは子実の窒素含有量をコムギ植物体全体の窒素含有量で除し、100を乗じて算出した。なお、本試験においては、コムギ植物体と茎葉、穂あるいは子実の窒素含有量の比較検討を行う際、子実タンパク質含有率ではなく、子実窒素含有量での表記とした。

麦作期間中の気象は、行橋アメダス（当场で観測）のデータを用いて、日平均気温および降水量について旬ごとに解析した。

結果

1. 麦作期間中の各年の気象概況と「ちくしW2号」の生育概況

平年に比べて日平均気温は、2011年播では12月下旬～2月中旬は低温、3月上旬および4月中旬～5月上旬は高温、その他の期間は平年並で経過した。2012年播では12月上旬～1月中旬は低温、1月下旬～3月中旬は2月中旬を除いて高温、3月下旬～5月中旬は平年並～低温で経過した。降水量は、2011年播では2月上旬～3月上旬および3月下旬、4月下旬は多雨であったが、その他の期間は平年並～少雨で、2012年播では、一部の期間を除いて12月中旬～2月中旬は多雨であったが、その他の期間は平年並～少雨であった（図2-1）。コムギの生育概況は、2011年播は出穂期が4月16日、成熟期が6月1日で、子実重は596 g m⁻²、子実タンパク質含有率は12.1%であった。2012年播は出穂期が4月11日、成熟期が6月1日で、子実重は651 g m⁻²、子実タンパク質含有率は12.5%で、2011年播に比べて子実重が多く、子実タンパク質含有率が高かった（表2-1）。

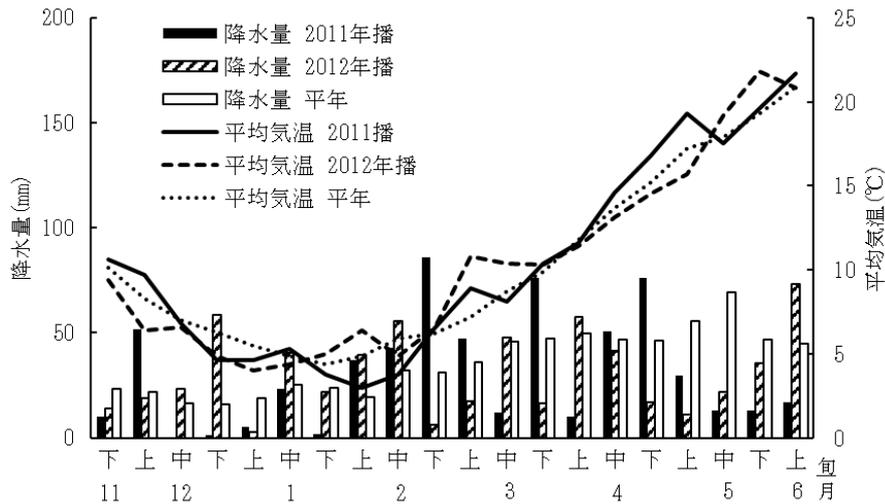


図2-1 生育期間中の気象概況(行橋アメダス).

表2-1 「ちくしW2号」の生育概況.

播種年	出穂期	成熟期	穂数	子実重	子実タンパク質含有率
	月日	月日	本 m^{-2}	gm $^{-2}$	%
2011年	4.16	6.1	397	596	12.1
2012年	4.11	6.1	508	651	12.6
t検定	—	—	**	**	*

子実重は、粗麦重で水分12.5%換算.

子実タンパク質含有率は、水分13.5%換算.

**, *は1%, 5%水準で有意差あり (t検定).

2. 登熟期間中における施肥および地力に由来する麦体中の窒素含有量

2011年播および2012年播の登熟期間中における施肥および地力に由来するコムギ植物体中の窒素含有量の推移を図2-2に示した. 両年ともに登熟期間を通して, 基肥由来, 分けつ肥由来および穂肥由来の窒素含有量は, 登熟ステージに関係なくほぼ一定の値で推移し, 登熟後期では, 基肥由来が $0.7 \sim 1.0 \text{ g m}^{-2}$, 分けつ肥由来が $1.5 \sim 2.3 \text{ g m}^{-2}$, 穂肥由来が $1.3 \sim 1.5 \text{ g m}^{-2}$ であった. 一方, 穂揃期追肥由来の窒素含有量は登熟初期から登熟中期にかけて増加し, その後は登熟後期まで一定の値を示し, $3.6 \sim 3.7 \text{ g m}^{-2}$ であった. 地力由来の窒素含有量は, 2か年ともに登熟後期まで増加し, 登熟後期では $5.6 \sim 8.3 \text{ g m}^{-2}$ で, 他の施肥由来の窒素含有量と比べて有意に多かった. 穂揃期追肥由来および地力由来の窒素含有量の増加により, 登熟後期のコムギ植物体中の窒素含有量は, 登熟初期に比べて2011年播では 4.0 g m^{-2} , 2012年播では 6.1 g m^{-2} 増加した. 窒素含有量の合計には年次間差が認められ, 2012年播は2011年播と比べていずれの時期においても $1.3 \sim 3.4 \text{ g m}^{-2}$ 多かった (二元配置の分散分析, 1%水準で有意).

次に, 茎葉, 穂あるいは子実別の窒素含有量の推移を表2-2に, 窒素構成比を表2-3に示

した。茎葉の窒素含有量は，登熟初期では基肥由来が $0.60\sim 0.66\text{ g m}^{-2}$ ，分けつ肥由来が $1.20\sim 1.86\text{ g m}^{-2}$ ，穂肥由来が 1.09 g m^{-2} ，穂揃期追肥由来が $0.61\sim 0.96\text{ g m}^{-2}$ ，地力由来が $3.10\sim 4.27\text{ g m}^{-2}$ であったが，登熟後期には，基肥由来が $0.10\sim 0.16\text{ g m}^{-2}$ ，分けつ肥由来が $0.22\sim 0.27\text{ g m}^{-2}$ ，穂肥由来が $0.14\sim 0.17\text{ g m}^{-2}$ ，穂揃期追肥由来が $0.18\sim 0.22\text{ g m}^{-2}$ ，地力由来が $0.97\sim 1.16\text{ g m}^{-2}$ といずれも減少した。一方，穂あるいは子実の窒素含有量は，登熟初期には基肥由来が $0.13\sim 0.19\text{ g m}^{-2}$ ，分けつ肥由来が 0.34 g m^{-2} ，穂肥由来が $0.31\sim 0.33\text{ g m}^{-2}$ ，穂揃期追肥由来が $0.13\sim 0.20\text{ g m}^{-2}$ ，地力由来が $0.91\sim 0.92\text{ g m}^{-2}$ であったが，登熟後期には，基肥由来が $0.64\sim 0.82\text{ g m}^{-2}$ ，分けつ肥由来が $1.25\sim 1.98\text{ g m}^{-2}$ ，穂肥由来が $1.16\sim 1.34\text{ g m}^{-2}$ ，穂揃期追肥由来が $3.38\sim 3.48\text{ g m}^{-2}$ ，地力由来が $4.64\sim 7.15\text{ g m}^{-2}$ といずれも増加した。窒素構成比は，登熟初期では茎葉に $78\sim 82\%$ ，穂に $18\sim 22\%$ の割合であったが，登熟後期では茎葉に $11\sim 13\%$ ，子実に $87\sim 89\%$ と変化した。

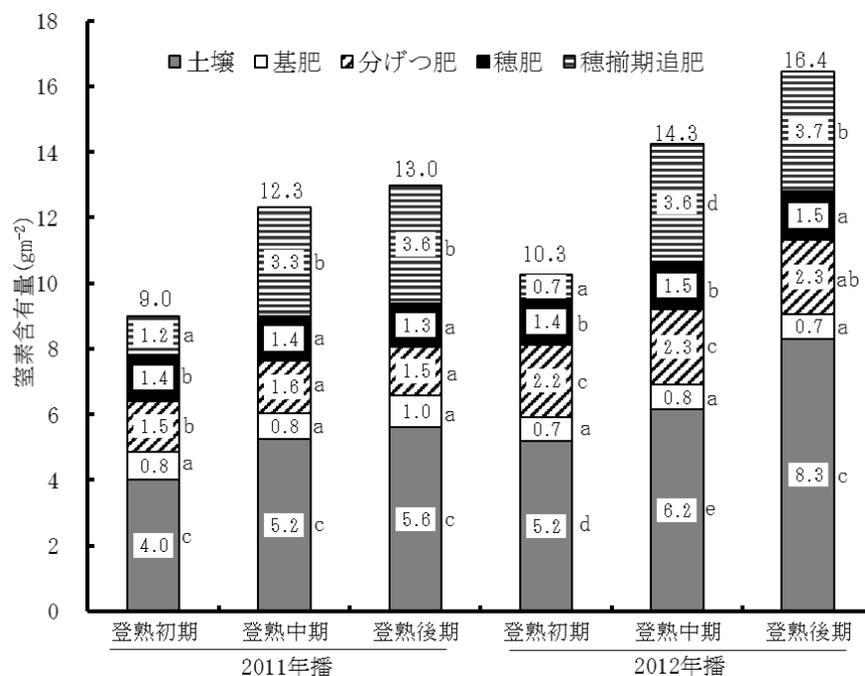


図2-2 登熟期間中における施肥および地力に由来するコムギ植物体中の窒素含有量の推移。

茎葉および穂(登熟初期，登熟中期)，子実(登熟後期)の窒素含有量の合計。

縦棒の上部にある数値は窒素含有量の合計値。

異英字間には同年播の同時期において5%水準で有意差あり(Tukeyの多重比較)。

表 2-2 茎葉，穂あるいは子実別の窒素含有量の推移.

施肥名 および 地力	器官	窒素含有量 (gm ⁻²)					
		2011年播			2012年播		
		登熟 初期	登熟 中期	登熟 後期	登熟 初期	登熟 中期	登熟 後期
基肥	穂(子実)	0.19	0.31	0.82	0.13	0.15	0.64
	茎葉	0.66	0.49	0.16	0.60	0.60	0.10
分けつ肥	穂(子実)	0.34	0.62	1.25	0.34	0.44	1.98
	茎葉	1.20	0.96	0.22	1.86	1.87	0.27
穂肥	穂(子実)	0.33	0.53	1.16	0.31	0.32	1.34
	茎葉	1.09	0.84	0.17	1.09	1.13	0.14
穂揃期 追肥	穂(子実)	0.20	1.77	3.38	0.13	0.82	3.48
	茎葉	0.96	1.55	0.22	0.61	2.77	0.18
地力	穂(子実)	0.91	2.11	4.64	0.92	1.37	7.15
	茎葉	3.10	3.14	0.97	4.27	4.78	1.16
小計	穂(子実)	1.96	5.34	11.25	1.83	3.10	14.59
	茎葉	7.02	6.97	1.73	8.43	11.15	1.85
総計		8.98a	12.31b	12.98b	10.25a	14.25b	16.44b

窒素含有量の値は乾物換算.

登熟初期，登熟中期は穂の窒素含有量，登熟後期は子実の窒素含有量.
同年播において異英字間に 5%水準で有意差あり (Tukey の多重比較).

表2-3 茎葉，穂あるいは子実別の窒素構成比の推移.

施肥名 および 地力	器官	窒素構成比 (%)					
		2011年播			2012年播		
		登熟 初期	登熟 中期	登熟 後期	登熟 初期	登熟 中期	登熟 後期
基肥	穂(子実)	2.1	2.5	6.3	1.3	1.1	3.9
	茎葉	7.3	4.0	1.2	5.9	4.2	0.6
分けつ肥	穂(子実)	3.8	5.0	9.6	3.3	3.1	12.0
	茎葉	13.4	7.8	1.7	18.1	13.1	1.6
穂肥	穂(子実)	3.7	4.3	8.9	3.0	2.2	8.2
	茎葉	12.1	6.8	1.3	10.6	7.9	0.9
穂揃期 追肥	穂(子実)	2.2	14.4	26.0	1.3	5.8	21.2
	茎葉	10.7	12.6	1.7	6.0	19.4	1.1
地力	穂(子実)	10.1	17.1	35.7	9.0	9.6	43.5
	茎葉	34.5	25.5	7.5	41.7	33.5	7.1
合計	穂(子実)	21.8	43.4	86.7	17.8	21.8	88.7
	茎葉	78.2	56.6	13.3	82.2	78.2	11.3

登熟初期，登熟中期は穂，登熟後期は子実の窒素構成比.

窒素構成比は，第 2 表の器官別窒素含有量を総計で除した割合.

3. 子実窒素含有量における窒素寄与率と施肥窒素利用率

2011年播および2012年播の登熟後期の子実窒素含有量における窒素寄与率を表2-4に示した. 窒素寄与率は両年ともに同様の結果を示し，基肥が4~7%と最も低く，分けつ肥および穂肥が9~14%，穂揃期追肥が24~30%で，地力が41~49%と最も高かった. 次に，2011年播および2012年播の登熟期間中におけるコムギ植物体中の窒素利用率の推移を図2-3に

示した。基肥の窒素利用率は登熟期間を通して最も低く、登熟後期において15～20%であった。分けつ肥の窒素利用率は生育期間を通じて基肥に次いで低く、また2012年で約20%高くなった。穂肥の窒素利用率は登熟初期で70～71%と最も高く、登熟後期においても66～74%と基肥および分けつ肥と比べて高く、穂揃期追肥と同水準であった。穂揃期追肥の窒素利用率は、他の施肥と比べて登熟初期では15～20%と低かったが、登熟中期にかけて顕著に上昇し、登熟後期には72～73%となった。

表 2-4 登熟後期の子実窒素含有量における窒素寄与率.

施肥名 および地力	窒素寄与率(%)	
	2011年播	2012年播
基肥	7.3a	4.4a
分けつ肥	11.1a	13.6b
穂肥	10.3a	9.2ab
穂揃期追肥	30.0b	23.9c
地力	41.3c	48.9d

異英字間には、年次ごとに由来窒素に有意差あり (Tukey の多重比較) .

地力の窒素寄与率は、 $100 - (\text{各施肥由来窒素寄与率の合計})$.

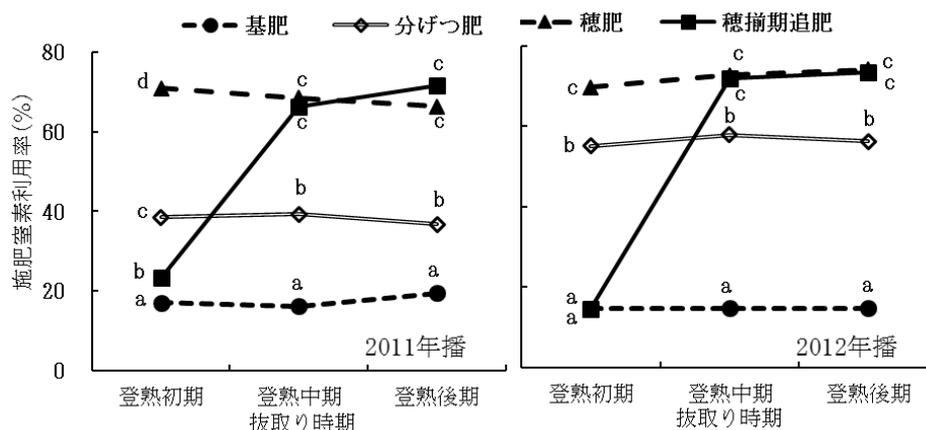


図2-3 登熟期間中におけるコムギ植物体中の窒素利用率の推移.

同一の採取時期には異英字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較).

考察

試験を実施した2か年の気象を平年と比べると、2011年播では1月下旬～2月中旬が低温で2月の降水量が多く、2012年播では1月下旬～2月上旬が高温で2月上～中旬の降雨が多く推移した (図2-1)。このため、2011年播では低温によるコムギの窒素吸収遅延と多雨による肥料流亡により、2012年播と比べて分けつ肥由来の窒素含有量が $0.7 \sim 0.8 \text{ g m}^{-2}$ 少なかった (一元配置の分散分析、5%水準で有意) と推察される (図2-2)。

登熟初期と登熟後期におけるコムギ植物体中の窒素含有量を比べると、試験を実施した2か年ともに基肥、分けつ肥および穂肥に由来する窒素の増加はみられず、穂揃期追肥および地力に由来する窒素は増加した（図2-2）。これは、出穂期までに吸収されなかった基肥、分けつ肥および穂肥由来の窒素は、降雨で流亡する等により土壌中の根域には残存しなかったためと推察される。

茎葉と穂あるいは子実の窒素構成比の推移をみると、茎葉の窒素構成比はいずれも登熟中期以降は低下し、それに対応して穂あるいは子実の窒素構成比が登熟中期以降、顕著に上昇し、登熟後期では87～89%の窒素が子実を集積されていた（表2-3）。木村ら（2001）は、日本めん用コムギでの成熟期における子実の窒素構成比は70%と高かったと報告しており、中華めん用コムギにおいては総窒素施用量が多いことから、この70%をさらに上回る高い水準の窒素構成比であったと考える。新良・西宗（1998）は、日本めん用コムギにおいて、収穫前10～13日から収穫期にかけてコムギ植物体全体で窒素含有量の増加は認められず、成熟期に子実の窒素構成比が高まることは転流によると報告している。水稻においても和田ら（1973）は、追肥した窒素は葉鞘、葉身に蓄積され、登熟が進むにつれ、その大部分は穂に移行するとしている。中華めん用コムギにおいても同様に、基肥、分けつ肥、穂肥に由来する窒素は吸収された後に茎葉に蓄積され、登熟中期以降に穂へ転流されることが考えられる。穂揃期追肥に由来する窒素は登熟中期まで、地力に由来する窒素は登熟後期までコムギの植物体に吸収されていること、穂揃期追肥および地力に由来する窒素は、登熟初期～登熟中期に茎葉および穂の両器官で窒素含有量の増加が認められることから、茎葉を経由せず、直接穂へ蓄積される窒素もあると推察される。また、分けつ肥に由来する窒素は、2011年播と2012年播とを比べると、登熟初期の茎葉において 0.66 g m^{-2} の差が認められた（一元配置の分散分析、5%水準で有意）。登熟後期において茎葉に残存した窒素量が2か年とも $0.22 \sim 0.27 \text{ g m}^{-2}$ と概ね同量であることから、 0.66 g m^{-2} の差は、子実における差へ反映される結果となり（表2-2）、両年の子実タンパク質含有率、子実重に差が現れた一因と考えられる（表2-1）。中辻（2003）は、成熟期における子実タンパク質含有率は、出穂期のコムギの窒素栄養に強く影響されると推察し、島崎ら（2015）は、開花期の窒素蓄積量が多いと子実タンパク質含有率が高いと報告している。本試験においては、登熟初期の窒素含有量の差により、子実タンパク質含有率のみならず、子実重においても差が認められた（表2-1、図2-2）。そのため、子実タンパク質含有率を高めるためだけでなく、収量向上のためにも、出穂期以前の施肥窒素のより効率的な茎葉への蓄積を促すことの重要性が示唆され、穂肥以前の施肥改善の余地があると考えられる。

登熟後期の子実における窒素寄与率は、地力が41～49%、穂揃期追肥が24～30%、分けつ肥および穂肥が9～14%、基肥が4～7%で、地力が最も高く、出穂期以前に施肥した窒素の寄与率は低かった（表2-4）。新良・西宗（1998）は、淡色黒ボク土の畑地において、子実窒素含有量のうち地力の窒素寄与率が46～60%であったと報告しており、本試験の結果は畑地と水田転換畑の違いはあるが、この報告と一致する水準であった。このことから、地力の向上により子実タンパク質含有率を高い水準で維持できる可能性があり、コムギ栽培においても堆肥の投入等による土づくりの重要性が示唆された。

登熟後期におけるコムギ植物体中の各施肥の窒素利用率は、基肥が15～20%、分けつ肥が37～56%、穂肥が66～74%、穂揃期追肥が72～73%であった(図2-3)。日本めん用コムギ(新良・西宗 1998)では、基肥が29～40%、起生期追肥が43%、出穂期追肥が58～63%と報告があり、本試験の結果は他の施肥と比較して基肥の窒素利用率が低く、出穂期以降の追肥の窒素利用率が高い点で一致した。基肥の窒素利用率が低いことが明らかとなったことから、肥料が高騰している近年の状況および全体の窒素利用効率を高めることを考慮し、基肥量の削減について検討の余地があると言える。分けつ肥の窒素利用率は、他の施肥と異なり年次により約20%の差がみられ、施肥窒素利用率が高かった2012年播は登熟後期における子実窒素含有量も2011年播と比べて多かった。分けつ肥の窒素利用率を安定させることが収量、品質の高位安定化を図るうえで、今後の課題の一つである。穂肥は施肥量が少ないため窒素含有量は少ないが、窒素利用率は穂揃期追肥と同水準で高い。穂肥の施肥時期は茎立期頃に相当し、過剰な施肥窒素による下位節間伸長に起因する倒伏を防止する(武田 2001)ため、福岡県では施肥量を 2 g m^{-2} (福岡県農林水産部 2010)と制限している。しかし、この時期の施肥窒素は利用率が高いことから、収量、子実タンパク質含有率の向上を図るうえで、施肥時期および施肥量について改善の余地があると考えられる。穂揃期追肥の窒素利用率は高く、子実窒素含有量への寄与率も最も高かった。したがって、既報(高山ら 2004)によって認められている穂揃期追肥による子実タンパク質含有率の向上効果は、他の施肥時期に比べて施肥窒素量の多さはもちろんのこと、施肥窒素利用率が高いことに起因するものである。

摘要

中華めん用コムギ「ちくしW2号」の子実タンパク質含有率が高位安定化する効率的な施肥体系を構築するために、 ^{15}N 標識硫酸を用いて、コムギ植物体中の窒素動態ならびに子実窒素含有量における施肥窒素の利用率および施肥窒素と地力窒素の寄与率を明らかにした。コムギ植物体中の窒素構成比は、登熟初期には茎葉で78～83%、穂で17～22%であったが、茎葉に蓄積された窒素が登熟期間中に子実へ転流し、登熟後期には87～89%の窒素が子実へ集積した。施肥ごとの窒素利用率は、基肥が15～20%と最も低く、分けつ肥は37～56%と年次間差が認められ、穂肥および穂揃期追肥は67～74%と高かった。子実窒素含有量における施肥および地力の窒素寄与率は、基肥が4～7%と最も低く、分けつ肥および穂肥が9～14%、穂揃期追肥が24～30%、地力が41～49%で最も高かった。子実タンパク質含有率を高位安定化するための今後の課題として、窒素利用率の低い基肥量の削減、窒素吸収量に年次間で差が認められた分けつ肥の窒素利用率の向上、施肥窒素利用率の高い穂肥の施肥時期および施肥量の見直し、地力の向上による窒素吸収量の増加が挙げられる。

第3章 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

中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」においては、良好なラーメン適性を保つため、子実タンパク質含有率が12%以上を有するコムギの安定生産と供給が、実需者から強く求められている。これまで、硬質コムギにおいて、子実タンパク質含有率を高めるための窒素施肥法については多くの報告（Cassmanら 1992, 佐藤ら 1999, 浦野・長嶺 2001, 山下ら 2005, 竹内ら 2006, Nakanoら 2008, 佐藤ら 2009, 岩渕ら 2013, 島崎ら 2013, 2014）があり、その大部分は穂揃期頃の追肥窒素量あるいは畑作コムギに関するもので、水田作コムギでの穂揃期後の追肥時期については未検討である。また、穂揃期後の追肥作業は多大な労力がかかるため、栃木県では実用化されている肥効調節型肥料を用いた省力施肥法について、北部九州の硬質コムギにおいても課題（田中ら 2008）となっている。しかし、北部九州において、水田作の中華めん用コムギとして適正子実タンパク質含有率12%以上を安定的に確保し、かつ、追肥作業の労力の低減を前提とした窒素追肥技術を検討した報告はない。

そこで本章では、水田圃場において¹⁵N標識硫酸を用いて、生産年の違いに関係なく、安定的に子実タンパク質含有率12%以上を確保するための「ちくしW2号」の穂揃期後の窒素追肥時期を明らかにし、穂揃期後の省力施肥法の開発について議論した。

材料と方法

1. 気象概況

麦作期間中の気象は、行橋アメダス（当場で観測）のデータを用いて、旬ごとに解析した。

2. 穂揃期後の窒素追肥時期が品質、収量および子実タンパク質含有率に及ぼす影響

「ちくしW2号」を供試し、2010～2011年の2か年（播種年、以下同じ）に福岡県農業総合試験場豊前分場（福岡県行橋市）の灰色低地土・埴壤土の水田圃場（水稻後作、全窒素含有率 0.17%, 全炭素含有率 1.87%）において試験を実施した。2010年播は11月24日、2011年播は11月28日に目標出芽本数を150本 m^{-2} とし、1区8.3 m^2 に播種し、2010年播は2反復、2011年播は3反復とした。播種方法は畦幅150 cmの4条の条播で、施肥は両年ともに、基肥は化成肥料（16-16-16）をN, P_2O_5 , K_2O の成分でそれぞれ5, 5, 5 $g m^{-2}$ 、追肥は化成肥料（16-0-16）を1追（1回目追肥, 1月下旬施肥）4, 0, 4 $g m^{-2}$ 、2追（2回目追肥, 3月上旬施肥）2, 0, 2 $g m^{-2}$ とした。穂揃期後の追肥量は窒素成分で5 $g m^{-2}$ 、粒状の硫酸で追肥し、追肥時期は、穂揃期, 穂揃期後7日, 14日, 21日, 28日の5時期とした。踏圧および土入れは両年ともに1月～3月にそれぞれ2回行った。各試験区ともにそれぞれの成熟期頃（福岡県農林水産部 2010）に3 m^2 を収穫し、収穫後は天日乾燥舎で自然乾燥し、小型脱穀機（木屋製作所製 TS型EAT0190）により脱穀した。千粒重, 収量, 容積重, 子実タンパク質含有率の測定には、2.2 mmの縦目篩いにより選別した整粒子実を供試し

た．容積重の測定はブラウエル穀粒計（藤原製作所製）で行い，作物体の窒素含有率はセミ・マイクロケルダール法，子実タンパク質含有率は近赤外多成分分析装置（FOSS社製，インフラテック1241）で測定し，水分含有率13.5%の換算値として示した．検査等級の格付を日本穀物検定協会九州支部へ依頼し，1等上（1）～2等下（6），規格外（7）の7段階で評価した．

3. 穂揃期後の窒素追肥時期の違いによる麦体中の窒素動態比較

「ちくしW2号」を供試し，2011年（播種年，以下同じ）に福岡県農業総合試験場豊前分場の水田圃場（水稻後作，全窒素含有率 0.17%，全炭素含有率 1.87%）において試験を実施した．播種方法は畦幅150 cmの4条の条播で，目標出芽本数を150 本 m^{-2} とした．試験の規模は1区0.15 m^2 ，2反復で11月28日に播種した．窒素肥料は基肥以下2追までは ^{15}N 非標識硫酸（以下，硫酸）とし，施肥量は窒素成分で基肥（播種時）5 $g m^{-2}$ ，1追（1月24日）4 $g m^{-2}$ ，2追（3月8日）2 $g m^{-2}$ とした．穂揃期後の追肥には ^{15}N 標識硫酸（5 atom%）を用いて，穂揃期，穂揃期後7日，14日，21日，28日の5時期に5 $g m^{-2}$ を追肥した．なお，各追肥日ともに対照として同量の硫酸を処理する区を設けた．また，各区ともに基肥時に P_2O_5 ， K_2O を成分量で5 $g m^{-2}$ 施肥した．踏圧および土入れは1月～3月にそれぞれ2回行った．成熟期に試験区の全株を抜き取り，根を切除後，穂と茎葉の部分に分けて105°Cで24時間通風乾燥し，窒素分析に供した．作物体の窒素含有率はセミ・マイクロケルダール法によって測定した． ^{15}N 濃度（atom% excess）は安定同位体質量分析計（Integra CN, Sercon）により測定した ^{15}N 存在比（atom%）より自然存在比0.366を減じることで算出した．追肥窒素寄与率は，算出された試料の ^{15}N 濃度（atom% excess）を ^{15}N 標識硫酸から自然存在比を減じた値で除し，100を乗じて算出した．

結 果

1. 麦作期間中の各年の気象概況

平均気温を平年と比べると，2010年播では概ね12月下旬～4月下旬は低温，5月上旬～中旬は高温で経過した．2011年播は概ね12月中旬～2月中旬は低温，2月下旬～4月上旬は平年並，4月中旬～成熟期は高温で経過した（図3-1）．降水量を平年と比べると，2010年播では1月中旬～4月下旬で少雨であったが，5月上旬～成熟期で多雨となり，2011年播では2月上旬～4月下旬は多雨であったが，5月上旬～成熟期は少雨であった（図3-1）．また，穂揃期後の窒素追肥日からその後の1mm以上の降雨日までの日数に追肥時期による年次間差があり，追肥日から降雨までの日数は，穂揃期後7日の追肥では2011年播は追肥後4日であったが，2010年播は追肥後8日と遅く，穂揃期後14日の追肥では2010年播は翌日であったが，2011年播は追肥後11日と非常に遅く日数を要した．一方，穂揃期および穂揃期後21，28日では，両年ともに追肥当日～追肥後5日の間に1mm以上の降雨があった（図3-2）．

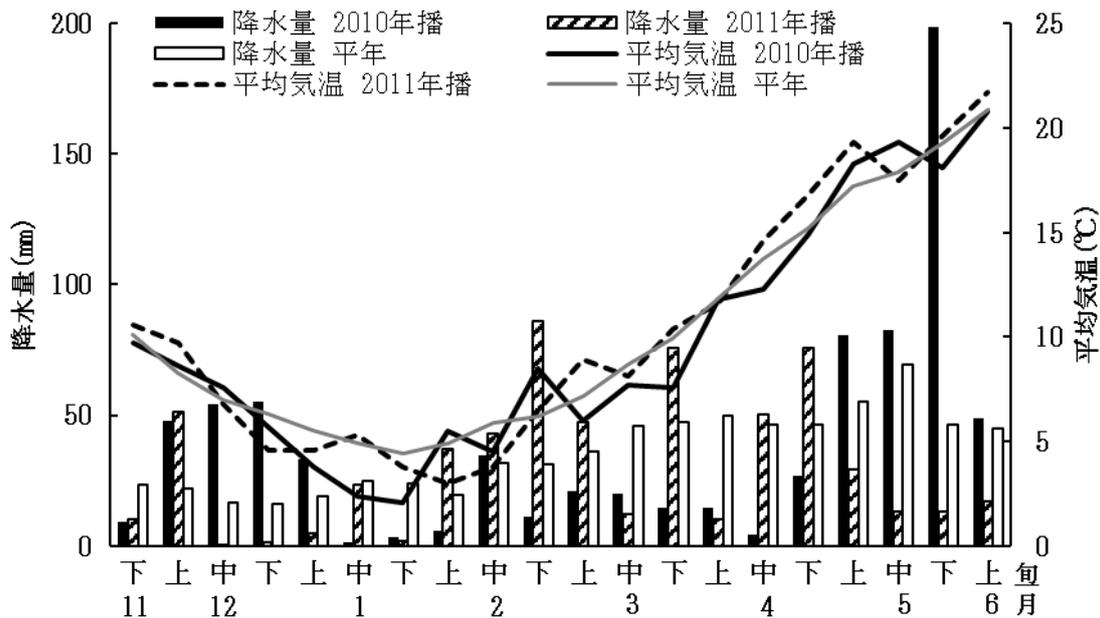


図3-1 生育期間中の気象概況（行橋アメダス）。

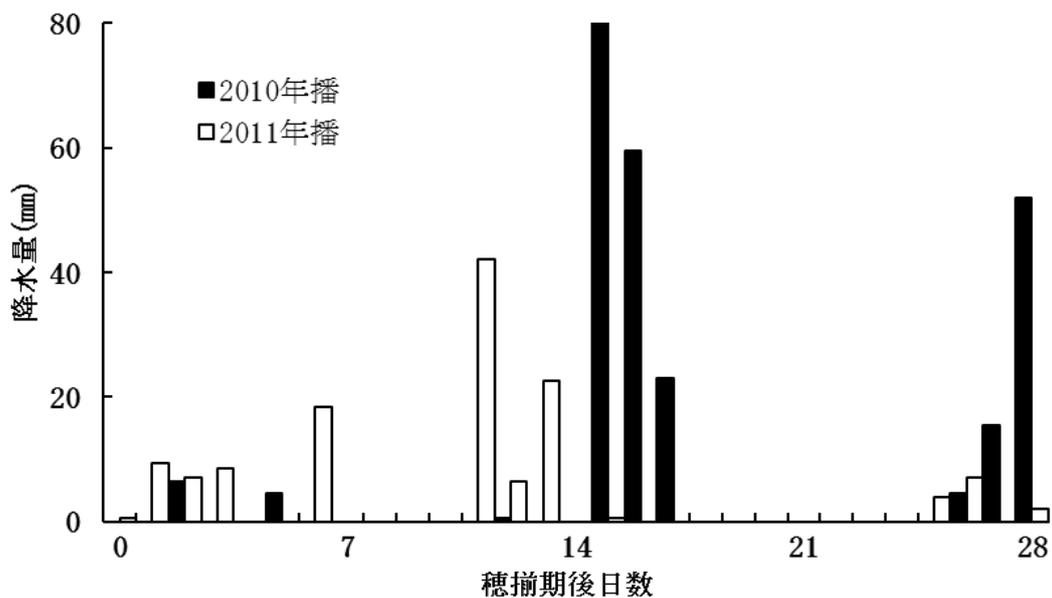


図3-2 穂揃期追肥後の日降水量（2010～2011年播 行橋アメダス）。

穂揃期は、2010年播が 4月25日、2011年播が 4月19日。

2. 穂揃期後の窒素追肥時期が品質、収量および子実タンパク質含有率に及ぼす影響

穂揃期後の窒素追肥時期が「ちくしW2号」の生育、収量および品質に及ぼす影響を表3-1に示した。成熟期は、穂揃期追肥に比べて、穂揃期後7日で同日～1日遅く、穂揃期後14日では1日遅く、穂揃期後21日および28日では1～2日早まった。稈長、穂長、穂数、容積重および収量は、追肥時期の違いによる差は認められなかったが、年次間差が認められ、2010年播は2011年播と比べて稈長、穂長が長く、穂数が多く、容積重は軽く、収量は優れた。千粒重は追肥時期と生産年次の違いで異なり、穂揃期～穂揃期後14日追肥で重く、穂

揃期後21日以降の追肥では軽かった。生産年次では、2011年播の方が重かった。検査等級は、両年いずれの追肥時期も1.0~2.0で1等に格付けされ良好であった。

次に、穂揃期後の窒素追肥時期が成熟期の子実タンパク質含有率と茎葉および子実の窒素含有率に及ぼす影響を表3-2に示した。穂揃期および穂揃期後7日の追肥では、2か年ともに子実窒素含有率が2.4%前後で、子実タンパク質含有率が13%以上と高かった。穂揃期後14~28日の追肥では、子実窒素含有率および子実タンパク質含有率に年次間差があり、2011年播では子実窒素含有率が低く、子実タンパク質含有率が12%以下であった。各播種年で穂揃期追肥の影響をみると、2010年播では、穂揃期と比べて穂揃期後21日および28日では子実の窒素含有率が低く、子実タンパク質含有率が有意に低かった。一方、穂揃期後7日および14日では子実の窒素含有率および子実タンパク質含有率に有意な差は認められず、子実タンパク質含有率は13%以上と高い水準であった。2011年播では、穂揃期と比べて穂揃期後14日で子実窒素含有率が低い傾向が認められ、穂揃期後21日および28日では有意に低く、3処理時期ともに子実タンパク質含有率は12%以下であり、12%以上確保するという目標に到達できなかった。しかし、穂揃期後7日では2010年播と同様に、子実の窒素含有率および子実タンパク質含有率には、穂揃期追肥との間に差は認められなかった。茎葉の窒素含有率には、年次間差が認められたが、追肥時期による差は認められなかった。子実窒素含有率は、いずれの窒素追肥時期においても80%以上と高く、吸収された窒素は茎葉から子実へ転流されることが示された。

表3-1 穂揃期後の窒素追肥時期が「ちくしW2号」の生育、収量および品質に及ぼす影響。

播種年	追肥時期	成熟期	稈長	穂長	穂数	倒伏程度	千粒重	容積重	子実重	検査等級
		月日	cm	cm	本 _m ⁻²		g	g/L	gm ⁻²	
2010年	穂揃期	6.6	90	9.1	490	2.8	40.4a	811	508	1.0
	穂揃期7日後	6.6	91	9.1	466	3.5	39.6a	806	515	1.0
	穂揃期14日後	6.7	90	9.1	504	3.0	40.0a	809	506	1.0
	穂揃期21日後	6.5	91	8.9	503	3.0	38.8a	806	509	1.0
	穂揃期28日後	6.5	92	9.2	470	3.5	38.7a	802	532	1.0
2011年	穂揃期	6.1	85	8.8	325	0	47.1c	821	426	1.0
	穂揃期7日後	6.2	85	8.8	316	0	47.0c	823	412	1.0
	穂揃期14日後	6.2	84	8.7	303	0	45.2b	824	422	1.0
	穂揃期21日後	6.1	84	8.6	319	0	43.5a	821	388	1.0
	穂揃期28日後	5.31	84	8.9	306	0	43.2a	817	387	2.0
	追肥時期	—	ns	ns	ns	—	**	ns	ns	—
	年次	—	**	**	**	—	**	**	**	—
	交互作用	—	ns	ns	ns	—	ns	ns	ns	—

穂揃期は、2010年播が4月25日、2011年播が4月19日。

倒伏程度は傾斜程度により、0(無), 1(微), 2(小), 3(中), 4(多), 5(甚)の6段階で示した。

一元配置の分散分析, **は1%水準で有意差あり。

各播種年で異英字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較)。

表3-2 穂揃期後の窒素追肥時期が成熟期の子実タンパク質含有率と茎葉および子実の窒素含有率に及ぼす影響。

播種年	施肥時期	子実タンパク質含有率 %	窒素含有率		子実窒素含有比 %
			茎葉 %	子実 %	
2010年	穂揃期	13.4b	0.33a	2.37bc	84
	穂揃期後7日	13.2b	0.34a	2.43c	84
	穂揃期後14日	13.1b	0.34a	2.38c	85
	穂揃期後21日	11.9a	0.33a	2.25ab	84
	穂揃期後28日	12.0a	0.35a	2.23a	83
2011年	穂揃期	13.2c	0.29a	2.47b	87
	穂揃期後7日	13.4c	0.27a	2.36b	87
	穂揃期後14日	11.7b	0.27a	2.13ab	86
	穂揃期後21日	10.3a	0.25a	1.89a	85
	穂揃期後28日	9.9a	0.26a	1.86a	84
	追肥時期	**	ns	**	—
	年次	**	**	**	—
	交互作用	**	ns	**	—

穂揃期は、2010年播が 4月25日, 2011年播が 4月19日。

茎葉, 子実の窒素含有率はセミ・マイクロケルダール法による測定で乾物換算。

子実窒素含有比は、子実窒素含有量 / (子実+茎葉の窒素含有量)*100。

一元配置の分散分析, **は 1%水準で有意差あり。

各播種年で異英字間に 5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較)。

3. 穂揃期後の追肥時期の違いによる麦体中の窒素動態比較

穂揃期後の追肥時期が成熟期における子実および茎葉の窒素含有量に及ぼす影響を図3-3に示した。子実の窒素含有量は、穂揃期追肥で 11.4 g m^{-2} であったのに対し、穂揃期後14日では 9.8 g m^{-2} 、穂揃期後21日および28日では 7.9 、 6.9 g m^{-2} と有意に少なかったが、穂揃期後7日では 11.7 g m^{-2} と同程度であった。一方、茎葉の窒素含有量には、追肥時期による差は認められなかった。穂揃期後に追肥した窒素の吸収量 (^{15}N 含有量) は、穂揃期追肥が 3.4 g m^{-2} であったのに対し、穂揃期後14日では 1.8 g m^{-2} 、穂揃期後21、28日では 0.6 g m^{-2} 以下と有意に少なかったが、穂揃期後7日では 3.3 g m^{-2} と穂揃期追肥と同等であった。茎葉においては穂揃期後に追肥した窒素の吸収量は、いずれの追肥時期においても差は認められなかった。

次に、穂揃期後の追肥時期と子実における追肥窒素の利用率および寄与率を図3-4に示した。穂揃期後に追肥した窒素の大部分は子実へ転流されるため、ここでは茎葉を含めず子実の窒素含有量のみから追肥窒素利用率を算出した。その結果、追肥窒素利用率は穂揃期後および穂揃期後7日の追肥で60%以上と高く、穂揃期後14日では32.5%と低下し、穂揃期後21日および28日ではそれぞれ10.3、3.1%と著しく低下した。穂揃期後の追肥時期と追肥窒素利用率との間には有意な負の関係が認められた ($r=-0.971^{**}$)。同様に、成熟期の子実窒素含有量に占める穂揃期後追肥由来の窒素含有量の割合を示す追肥窒素寄与率は、穂揃期および穂揃期後7日では30%程度と高く、穂揃期後14日以降については窒素追

肥が遅れるほど低下し、穂揃期後の追肥時期と追肥窒素寄与率との間において有意な負の相関が認められた ($r=-0.964^{**}$).

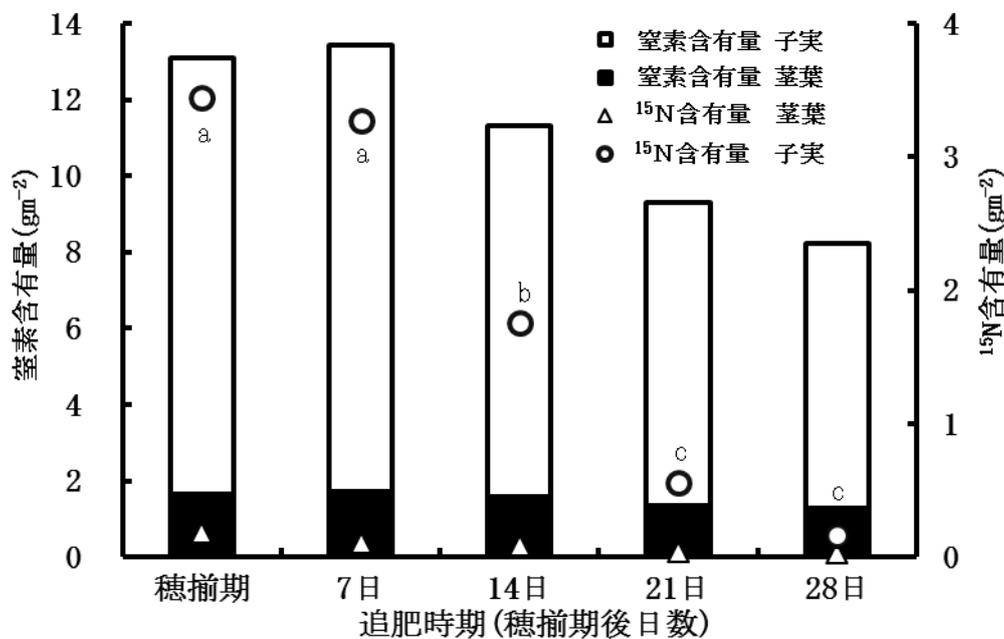


図3-3 穂揃期後の窒素追肥時期が成熟期における子実および茎葉の窒素含有量に及ぼす影響(2011年播).
異英字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較).

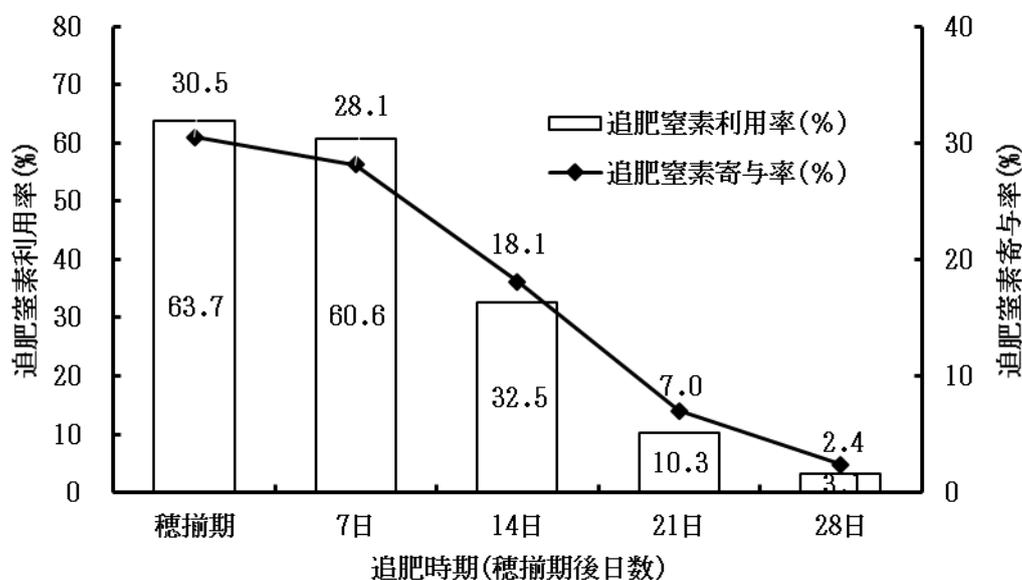


図3-4 穂揃期後の窒素追肥時期と子実における追肥窒素の利用率および寄与率(2011年播).

図中の数値は、上段：施肥窒素寄与率，下段：施肥窒素利用率を示す.

考察

試験を実施した2か年で稈長、穂長、穂数、千粒重、容積重、収量に年次間差が認められた（表3-1）。これは、生育期間中の両年の降雨時期の影響を受けたためと考えられる。2010年播では生育初期～出穂期頃は少雨で、出穂期以降は多雨であったが、2011年播では逆に生育初期～出穂期頃は多雨で、出穂期以降は少雨であった（図3-1）。2010年播は生育初期～出穂期頃まで少雨であったことから穂数は確保されたが、出穂期以降の多雨により千粒重および容積重が軽く、2011年播は生育初期～出穂期頃の多雨により穂数は減少したが、出穂期以降の少雨により千粒重、容積重が重かったと推察される。収量は、穂数が確保された2010年播で多かった。

子実タンパク質含有率について、本試験で供試した「ちくしW2号」のラーメン適性が良好となる子実タンパク質含有率は12%以上（古庄ら 2013）であることから、12%以上を窒素追肥時期の適否として判断する。試験を実施した2か年ともに子実タンパク質含有率が目標とする12%を上回った穂揃期後の追肥時期は、穂揃期と穂揃期後7日の区であり、いずれの年においても13%以上が確保された（表3-2）。¹⁵N標識硫酸を用いて穂揃期後に追肥した窒素の吸収動態を2011年播でみると、穂揃期および穂揃期後7日の追肥では、窒素利用率が60%以上と高く、¹⁵N標識硫酸由来の子実窒素含有量が約3.4 g m⁻²と多かった。また、追肥窒素寄与率は両追肥時期ともに30%程度と高かった（図3-3、図3-4）。

以上のことから、穂揃期と穂揃期後7日の追肥で安定的に12%以上を確保できた理由としては、穂揃期後に追肥した窒素の吸収量が多かったことがあげられる。したがって、子実タンパク質含有率が12%以上となるための有効な追肥時期は、穂揃期から穂揃期後7日である。この結果は、穂揃期後の追肥により子実タンパク質含有率が高まるとした高山ら（2004）の出穂後10日追肥、山下ら（2005）、竹内ら（2006）の穂揃期追肥の報告を支持するものである。なお、一般にコムギの子実タンパク質含有率と収量との間には負の相関関係があり、収量が増加するにしたがい子実タンパク質含有率は低下することが広く知られている（江口ら 1969、佐藤 1991、谷口ら 1999）。また、子実タンパク質含有率と千粒重との間には負の相関関係があることが認められている（岩淵ら 2011）。しかし、本試験においては、2010年播と2011年播の収量に差が認められたにも関わらず、両年ともに子実タンパク質含有率が13%程度と同程度であった。この要因としては、2010年播は収量が多かったものの千粒重が40g程度と軽く、2011年播は逆に収量が少なかったものの千粒重が47gと重かったこと（表3-1）によって、収量の多少および千粒重の軽重に相殺されたためと考える。

穂揃期後14日の窒素追肥では、子実タンパク質含有率は、2010年播では12%以上であったが、2011年播では12%以下であった。2011年播の¹⁵N標識硫酸の吸収動態をみると、成熟期における¹⁵N標識硫酸由来の子実窒素含有量が穂揃期および穂揃期後7日の追肥と比べて50%程度と少なかった（図3-3）。また、追肥窒素利用率は33%で、追肥窒素寄与率も18%と低かった（図3-4）。このことから、穂揃期後14日追肥では、追肥窒素利用率の低下に起因する麦体の窒素の吸収量が少なかったことがうかがえる。この年次による違いの要

因としては、追肥後の降雨の影響が考えられる。佐藤ら（2009）は、春播コムギの開花期の硫安追肥では、追肥後の降雨量の違いにより子実タンパク質含有率が影響を受けることを報告している。本試験において穂揃期後14日追肥の後に1 mm以上の降雨があったのは、2010年播は追肥した翌日であったのに対し、2011年播は追肥後11日（穂揃期後25日）を要した（図3-2）。このため、2011年播の穂揃期後14日追肥で子実タンパク質含有率が低かった理由としては、追肥した硫安の溶解が遅れたことによる麦体の窒素吸収の遅れにともなう追肥窒素利用率の低下によるものと考えられる。穂揃期後21日および28日の窒素追肥では、穂揃期施用と比べて2か年ともに子実タンパク質含有率が有意に低く、特に2011年播では約10%で、目標値である12%には到達することはできなかった（表3-2）。これは、追肥窒素利用率が著しく低く、子実窒素含有量が極端に少なくなったためである（図3-3、図3-4）。このことは、岩渕ら（2013）の報告と同様の結果となった。また、穂揃期後14日以前の施用と比べて千粒重が軽かったことから、穂揃期後の追肥効果（Cassman 1992, 高山ら 2004, 山下ら 2005）が低いことが示唆され、コムギの窒素吸収能は穂揃期後21日以降では低下していることが推察される。したがって、子実タンパク質含有率向上からみた穂揃期後21日および28日の窒素追肥は、時期が不適と判断される。

福岡県では実需者の要望に応えるために、穂揃期追肥を前提とした「ちくしW2号」、
「ミナミノカオリ」（藤田ら 2009）等の中華めん・パン用品種の作付拡大を誘導している。しかし、現行の施肥体系で必須となっている穂揃期追肥は生産者にとって重労働であることから、省力化の要望が多い（田中ら 2008）。このため、出穂後にも十分な窒素吸収を促進させるための省力施肥技術の確立が重要である。北部九州においては、省力施肥技術として日本めん用品種で肥効調節型肥料の活用が実用化されているが（土屋ら 2007, 田中ら 2008）、中華めん・パン用品種では子実タンパク質含有率の目標値の水準が日本めん用品種よりもさらに2~3ポイント高いため、未だ実用化されていない。本試験において、子実タンパク質含有率を安定的かつ効率的に高める追肥時期は穂揃期～穂揃期後7日であったが、穂揃期後14日でも追肥後の降雨により速やかに硫安が溶解した場合、穂揃期追肥と同等の効果を期待できることが示唆された。すなわち、今後、肥効調節型肥料を利用した施肥体系を構築していくにあたっては、肥効調節型肥料の性質上、窒素の溶出期間を要するため、穂揃期～穂揃期後14日の間に、追肥窒素利用率が60%以上となるような溶出タイプのものを選定していく必要がある。

摘要

中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」において、子実タンパク質含有率が12%以上となる穂揃期後の窒素追肥時期について¹⁵N標識硫安を用いて明らかにした。穂揃期および穂揃期後7日の追肥では、生産年の違いに関係なく、安定的に子実タンパク質含有率が12%以上と高かった。また、成熟期における追肥窒素利用率および追肥窒素寄与率（子実窒素含有量に占める穂揃期後追肥由来の窒素含有量の割合）と穂揃期追肥時期との間には、有意な負の相関関係が認められた。穂揃期および穂揃期後7日の追肥では、子実における追肥窒素利用率が概ね60%で、子実窒素含有量に占める穂揃期後追肥の寄与率が30%

と高かった。穂揃期後14日の追肥では、施肥後の降雨の有無によりコムギの窒素吸収が影響を受け、穂揃期後21日および28日の追肥では、追肥窒素利用率が低く、寄与率も低かったことから成熟期の子実窒素含有量が少なく、子実タンパク質含有率は安定して12%以上を確保できなかった。これらのことから、硫安を施肥する場合、穂揃期後の追肥によって子実タンパク質含有率が安定して12%以上となる追肥時期は、追肥窒素利用率が60%、追肥窒素寄与率が30%程度以上となる穂揃期および穂揃期後7日の間と判断された。

第4章 中華めん用コムギ「ちくしW2号」において高い子実タンパク質含有率を確保し、穂肥と穂揃期追肥を省略できる省力施肥法

これまで穂揃期追肥の省力化のため、出穂期後の尿素の葉面散布（岩渕ら 2013）や基肥に速効性肥料と肥効調節型肥料の配合肥料（配合肥料）の全量施用（中司ら 2010）、穂肥にリニア型あるいはシグモイド型の肥効調節型肥料の施用（中司ら 2010、村田ら 2017）が検討されている。しかし、尿素の葉面散布は乗用管理機が必要であり、基肥全量施用では施用量が多くなり、播種同時施肥機の施肥可能量を超えることが危惧され、穂肥時の配合肥料施用は、肥効調節型肥料の窒素溶出が遅いことから、施用窒素量の増量が必要となる。

そこで、本研究では、肥効調節型肥料の窒素溶出を適期に合わせ、施用量を抑制するために配合肥料の施用時期を分けつ期とし、肥効調節型肥料の期間別窒素溶出量とコムギへの影響を調査し、穂肥と穂揃期追肥の削減を検討した。あわせて、第2章および第3章に取りまとめた知見から、高品質麦生産のための肥効調節型肥料として、溶出パターンは茎立期までは窒素溶出を抑制し、茎立期頃から穂揃期頃にかけて窒素が溶出するシグモイド型とし、溶出タイプは、窒素溶出の早進化のため溶出期間の最も短い20日タイプ、これらの条件を満たす被覆尿素シグモイド型エムコート20日タイプ（ジェイカムアグリ株式会社、S20）を選定した。また、シグモイド型の窒素溶出は温度に依存するため、年次により溶出パターンが変動することが考えられることから、加水分解型の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、IB）の配合肥料も検討し、慣行の追肥3回体系を追肥1回とする高品質麦生産が可能な省力施肥体系を検証した。

材料と方法

1. S20の期間別窒素溶出量

S20の期間別窒素溶出量を推定するため、福岡県農林業総合試験場豊前分場（福岡県行橋市）の水田圃場（水稻後作、全窒素含有率0.17%、全炭素含有率1.87%）において、2012～2014年（播種年、以下同じ）の3か年間、埋設試験を行った。S20をポリエステル製のメッシュ袋に2.5 gずつ入れて、分けつ肥施肥時（2012年播は1月31日、2013年播と2014年播は1月28日）に地表面に14袋設置後、地域慣行で行われている土入れ作業を再現するため覆土し、概ね15日ごとに2袋ずつ回収した。回収したS20は、PDAB発光法の吸光光度法により残存窒素量を求めた。それぞれの残存窒素量から窒素溶出率を算出し、施肥窒素量を 8 g m^{-2} とした場合の窒素溶出量に換算した。さらに、前回調査時の窒素溶出量を差し引いて、期間別の窒素溶出量を算出した。

2. 茎立期または止葉抽出期から登熟期の窒素吸収が収量、品質に及ぼす影響

分けつ期に施肥したS20は、茎立期以降に溶出することが予想されることから、茎立期または止葉抽出期から成熟期の期間に吸収された施肥窒素が、コムギ植物体中の窒素含有量、収量、子実タンパク質含有率に及ぼす影響を検討した。コムギ品種は「ちくしW2号」

を供試し、前述の試験と同一圃場で試験を実施した。播種方法は、畦幅150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150本 m^{-2} とした。試験の規模は1区0.15 m^2 の2反復で、2013年播は11月22日に、2014年播は11月21日に播種した。穂肥以外の施肥窒素量は、両年とも基肥（播種直後施肥）5 g m^{-2} 、分けつ肥（分けつ期、両年とも1月28日施肥）4 g m^{-2} 、穂揃期追肥（2013年播は4月15日、2014年播は4月9日施肥）5 g m^{-2} とし、各区とも基肥時にリン酸、カリをいずれも成分量で5 g m^{-2} 施用した。穂肥の施用時期は、茎立期（2013年播は3月4日、2014年播は3月5日施肥）と止葉抽出期（2013年播は3月24日、2014年播は3月23日施肥）の2水準設け、 ^{15}N 標識硫安（5 atom%）を2 g m^{-2} 施用した。踏圧および土入れは1月～3月にそれぞれ2～3回行った。

登熟初期（出穂期後10～15日）と登熟後期（成熟期）に試験区の全株を抜き取り、根を切除後、穂と茎葉の部分に分けて105℃で24時間通風乾燥し、乾物重を測定後、窒素分析に供した。 ^{15}N 濃度（atom% excess）は、安定同位体質量分析計（Integra CN, Sercon）により測定した ^{15}N 存在比（atom%）より自然存在比0.366を減じることで算出した。肥料の ^{15}N 濃度（atom% excess）でコムギ植物体中の ^{15}N 濃度（atom% excess）を除して100を乗じたものを穂肥の施肥窒素寄与率とした。コムギ植物体の全窒素含有率をセミ・マイクロケルダール法にて測定し、乾物重を乗じることで窒素含有量を算出した。算出した窒素含有量に穂肥の施肥窒素寄与率を乗じて穂肥由来の窒素含有量を算出し、穂肥の窒素施肥量で除し、100を乗じて穂肥の施肥窒素利用率を算出した。

3. 省力施肥による「ちくしW2号」の生育、収量

「ちくしW2号」を供試し、2012～2014年播で前述の試験と同一圃場で試験を実施した。播種方法は畦幅150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150本 m^{-2} とした。試験の規模は1区8.3 m^2 の3反復で、11月21～22日に播種した。基肥（播種直後施肥）は、全区速効性の化成肥料（16-16-16）を窒素、リン酸、カリの成分でそれぞれ5, 5, 5 g m^{-2} とした。省力施肥区は、分けつ肥（分けつ期、1月下旬施肥）時に、速効性肥料（16-0-16）で3, 0, 3 g m^{-2} とS20（41-0-0）9, 0, 0 g m^{-2} の配合、あるいは速効性肥料で3, 0, 3 g m^{-2} とS20で8, 0, 0 g m^{-2} およびIB（33-0-0）で1, 0, 0 g m^{-2} の配合肥料を施用した。配合肥料での肥効調節型肥料の窒素量は、分施の穂肥と穂揃期追肥をあわせた窒素施肥量7 g m^{-2} に2 g m^{-2} を増肥し、分けつ肥の速効性肥料を1 g m^{-2} 減じた。分施区は福岡県の施肥基準（福岡県農林水産部経営技術支援課 2018）に基づき、追肥に速効性肥料（16-0-16）を分けつ肥で4, 0, 4 g m^{-2} 、穂肥（茎立期、3月上旬施肥）で2, 0, 2 g m^{-2} 、穂揃期追肥に粒状の硫安（21-0-0）で5, 0, 0 g m^{-2} 施用し、比較検討した（表4-1）。

表4-1 省力施肥試験の追肥量と肥料の種類

試験区	分げつ肥					穂肥			穂揃期追肥 窒素
	窒素			リン酸	カリ	窒素	リン酸	カリ	
	速効性	S20	IB						
速効性+S20	3	9	0	0	3	0	0	0	0
速効性+S20+IB	3	8	1	0	3	0	0	0	0
分施	4	0	0	0	3	2	0	2	5

数値は成分量 (g m⁻²) .

結果

1. S20の期間別窒素溶出量

1月下旬（分げつ肥施用時）に埋設したS20の期間別窒素溶出量を図4-1に示した。S20の窒素溶出量は、3か年とも埋設から埋設後45日頃（節間伸長期）までは合計0.4 g m⁻²以下に抑制された。埋設後45日頃以降は、2012年播と2013年播では、埋設後45日頃～60日頃（節間伸長期～止葉抽出期）の期間で0.92～1.51 g m⁻²，埋設後60日頃～75日頃（止葉抽出期～開花期頃）の期間で2.09～2.17 g m⁻²，埋設後75日頃～90日頃（開花期頃～出穂期後17～21日）の期間で1.90～1.93 g m⁻²と、窒素溶出量は節間伸長期以降に増加した。2014年播は、埋設後48～63日（節間伸長期～止葉抽出期）の期間は0.37 g m⁻²と少なかったが、埋設後64～78日（止葉抽出期～開花期頃）の期間で1.39 g m⁻²，埋設後79～93日（開花期頃～出穂期後24日）の期間で2.94 g m⁻²と、窒素溶出量は止葉抽出期以降に増加した。

2. 茎立期または止葉抽出期の穂肥施用が収量、品質に及ぼす影響

茎立期または止葉抽出期に施用した穂肥が、コムギ植物体中の窒素含有量、収量、品質に及ぼす影響を表4-2に示した。穂肥由来の窒素含有量は、茎立期の施用では登熟初期が茎葉で1.12 g m⁻²，穂で0.27 g m⁻²，登熟後期が茎葉で0.16 g m⁻²，子実で1.24 g m⁻²であった。止葉抽出期の施用では、登熟初期が茎葉で0.98 g m⁻²，穂で0.35 g m⁻²，登熟後期が茎葉で0.11 g m⁻²，子実で1.17 g m⁻²であった。穂肥由来の窒素含有量は、登熟初期では止葉抽出期施用で穂の窒素含有量が多く、登熟後期では茎立期施用で茎葉の窒素含有量が多かった。穂肥の施肥窒素利用率，穂数，子実タンパク質含有率，子実重に差は認められなかった。

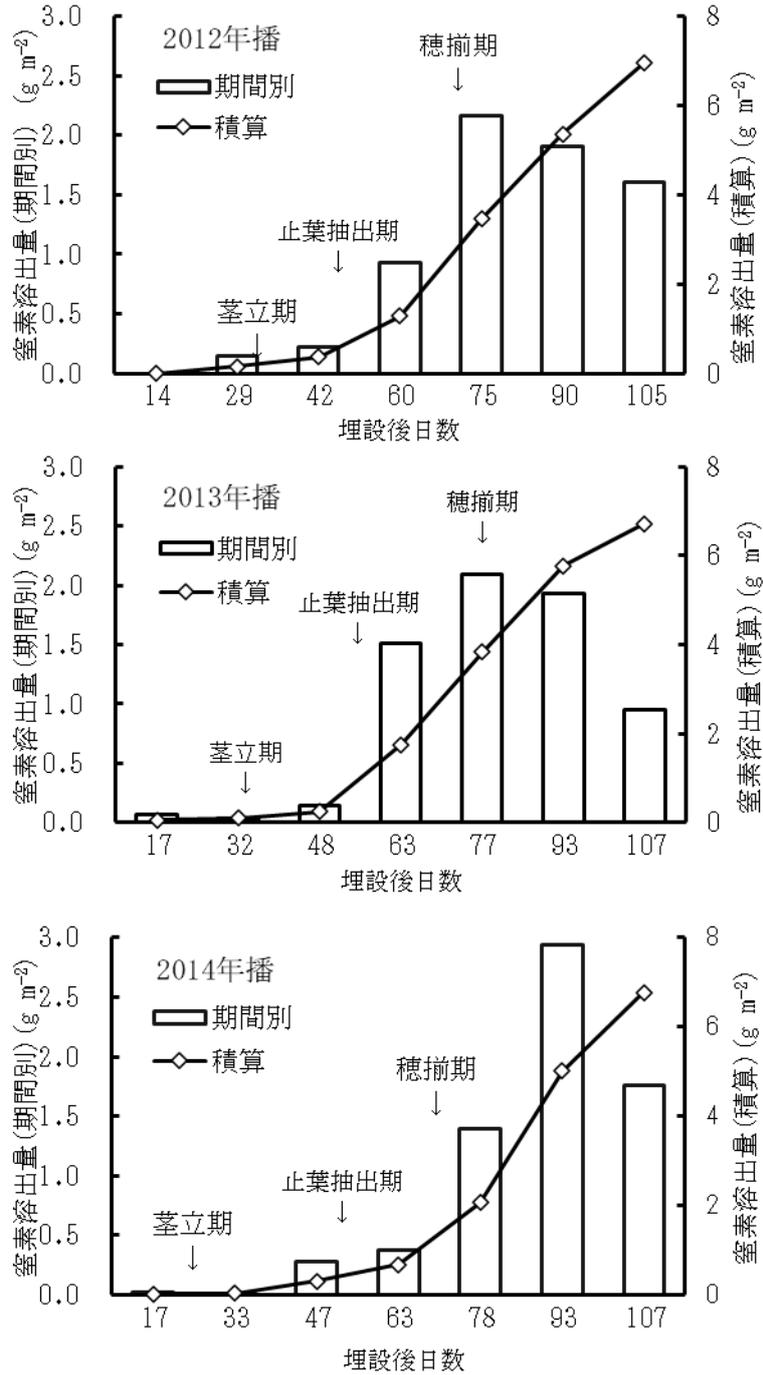


図4-1 埋設試験におけるS20の期間別窒素溶出量。

コムギを栽培した水田圃場にS20をポリエステル製のメッシュ袋に入れて埋設試験を実施。

窒素溶出量は、窒素溶出率に施肥量 (8 g m⁻²) を乗じて算出した。

表4-2 穂肥の施用時期が「ちくしW2号」の登熟期における穂肥由来の窒素含有量および収量、品質に及ぼす影響.

穂肥施用 時期	窒素含有量				穂肥の 施肥窒素 利用率	穂数 本 m ⁻²	子実重 g m ⁻²	子実 タンパク 質含有率 %
	登熟初期		登熟後期					
	茎葉 g m ⁻²	穂 g m ⁻²	茎葉 g m ⁻²	子実 g m ⁻²				
茎立期	1.12	0.27	0.16	1.24	68.4	472	65.6	12.4
止葉抽出期	0.98	0.35	0.11	1.17	65.8	487	66.4	12.1
施肥時期	n. s.	*	*	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
年次	**	*	**	*	*	*	n. s.	**
交互作用	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

2013～2014年播の 2か年平均.

子実重は、粗麦重で水分12.5%換算.

子実タンパク質含有率は、水分13.5%換算.

二元配置の分散分析, **, *は各々 1%, 5%水準で有意差あり.

3. 省力施肥による「ちくしW2号」の生育、収量、品質

施肥法別の生育、収量、品質を表4-3に示した. 分施と比べると、速効性肥料とS20の配合肥料では、茎数および穂数が少ない傾向で、2014年播においては5%水準で有意に少なく、出穂期、成熟期はほぼ同日であった. 速効性肥料とS20およびIBの配合肥料では、茎数、穂数が少ない傾向がみられたものの有意差は認められず、出穂期は同日、成熟期は1日程度遅かった. 倒伏程度に試験区の差は認められなかった. 両省力施肥区の収量は、2012年播および2014年播では同程度、2013年播では有意に高く、品質に差はなく、子実タンパク質含有率は、分施区では12%以下となった2014年播を含めて試験を実施した3か年とも12%以上を確保できた (図4-2).

表4-3 省力施肥法が「ちくしW2号」の生育，収量，品質に及ぼす影響。

播種年	試験区	茎数 本 m ⁻²	出穂期	成熟期	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本 m ⁻²	倒伏 程度	千粒重 g	容積重 g L ⁻¹	子実重 g m ⁻²	検査 等級
2012	速効性+S20	665 a	4月10日	6月1日	92	9.0	412 a	0.0	46.6 a	821	58.9 a	1.7
	速効性+S20+IB	711 a	4月11日	6月2日	91	8.8	442 a	0.0	46.3 a	813	58.0 a	2.3
	分施	739 a	4月11日	6月1日	92	8.7	459 a	0.0	47.1 a	821	57.8 a	1.3
2013	速効性+S20	696 a	4月14日	6月3日	93	9.1	476 a	3.7	44.6 a	832	63.0 a	2.0
	速効性+S20+IB	689 a	4月14日	6月2日	93	9.0	468 a	3.3	44.7 a	831	63.5 a	2.0
	分施	722 a	4月14日	6月2日	92	8.8	483 a	3.3	45.8 a	831	56.3 b	2.0
2014	速効性+S20	567 a	4月7日	5月27日	88	9.9	330 b	0.3	45.1 a	825	52.9 a	2.0
	速効性+S20+IB	585 a	4月7日	5月28日	89	9.9	362 ab	0.0	44.5 ab	821	53.2 a	2.0
	分施	604 a	4月7日	5月27日	90	9.9	398 a	0.7	44.1 b	828	54.4 a	2.0
	施肥法	*	-	-	n. s.	n. s.	**	-	n. s.	n. s.	n. s.	-
	年次	**	-	-	**	**	**	-	**	**	**	-
	交互作用	n. s.	-	-	n. s.	n. s.	n. s.	-	**	n. s.	*	-

茎数は3月2～6日の調査。

倒伏程度は傾斜程度により，0(無)，1(微)，2(少)，3(中)，4(多)，5(甚)の6段階で示した。

容積重はブラウエル穀粒計による測定値。

検査等級は，1(1等上)，2(1等中)，3(1等下)，4(2等上)，5(2等中)，6(2等下)の6段階で示した。

二元配置の分散分析，**，*は各々1%，5%水準で有意差あり。

異英字間に同一播種年において 5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較)。

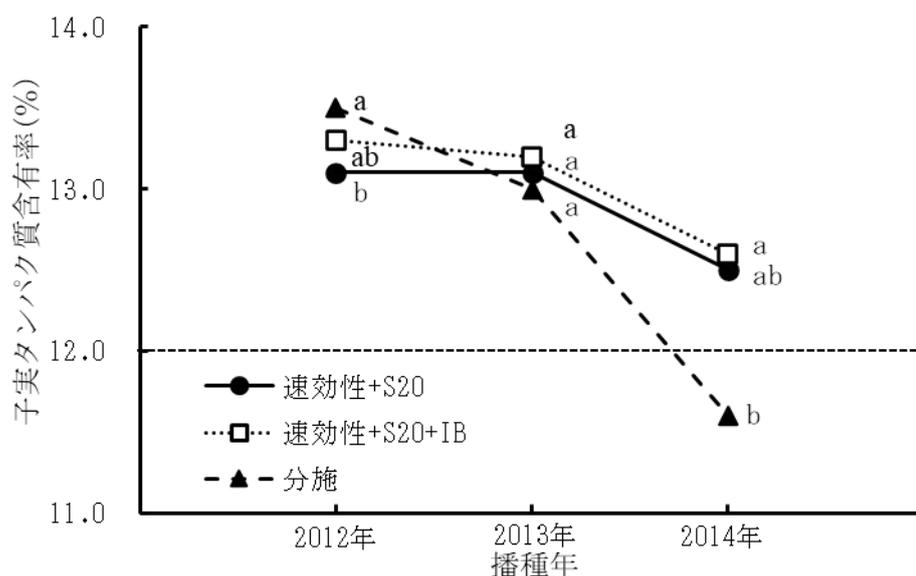


図4-2 施肥法と子実タンパク質含有率の年次変動。

子実タンパク質含有率は，インフラテック1241で測定 (水分13.5%換算値)。

異英字間に同一播種年において 5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較)。

考察

中華めん用コムギ「ちくしW2号」において，分けつ期に速効性肥料と肥効調節型肥料の配合肥料を施用し，穂肥と穂揃期追肥を省略する省力施肥体系を検討した。最初に肥効調節型肥料S20の期間別窒素溶出量を調査した。期間別窒素溶出量は，分けつ期に埋設した場合，埋設後45日頃 (節間伸長期) までは3か年とも0.4 g m⁻²以下であったが，埋設後

45日頃～60日頃（節間伸長期～止葉抽出期）と埋設後60日頃～75日頃（止葉抽出期～開花期頃）では、それぞれ $0.37\sim 1.51\text{ g m}^{-2}$ 、 $1.39\sim 2.17\text{ g m}^{-2}$ （図4-1）と年次により異なり、2014年播は他の2か年と比べて止葉抽出期～開花期頃の窒素溶出量が少なかった。S20の窒素溶出は温度依存型であるため、溶出量に差が生じた3月中旬以降の各年の平均気温を平年と比べると、3月中旬と下旬では2012年播は $1.2\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ 、2013年播は $1.2\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 、2014年播は $0.4\sim 1.7^{\circ}\text{C}$ といずれも高く、4月上旬では2012年播は 2.2°C 高く、2013年播および2014年播は 0.4°C 低かった（行橋アメダス、データ略）。このため、2014年播の窒素溶出が遅れた要因は、平均気温以外の要因が考えられた。小林ら（1997）は、シグモイド型の溶出の開始には被覆膜の中に一定の水分侵入が必要であることを報告している。S20を1月28、31日に埋設した後の2月の降水量を平年と比べると、2012年播と2013年播は127、129%であったのに対し、2014年播は73%（行橋アメダス、データ略）で、2014年播で窒素の溶出が遅れたのは、2月の降水量が少なく、被覆膜内への水分の侵入が不十分で溶出が遅れた可能性が推察された。福岡県の施肥基準では、分施における穂肥の施肥時期は茎立期で、施肥窒素量は 2 g m^{-2} である（福岡県農林水産部経営技術支援課 2018）。S20の累積の窒素溶出量が、分施の穂肥施肥窒素量と同程度の 2 g m^{-2} となるのは止葉抽出期～開花期であり、茎立期より遅いことが明らかとなった。そのため、穂肥としてのS20の効果を検討する上で、茎立期から止葉抽出期頃の窒素供給が、コムギ植物体中の窒素含有量とコムギの収量、品質に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられた。

そこで、次に、 ^{15}N 標識硫酸を茎立期または止葉抽出期に施用し、穂肥由来の窒素含有量と施肥窒素利用率を調査した。穂肥を茎立期または止葉抽出期に施用した場合、施肥窒素利用率、穂数、子実重、子実タンパク質含有率に有意な差は認められなかった（表4-2）。第2章において、穂肥を茎立期に施用した場合、穂揃期追肥と同様に施肥窒素利用率が70%程度と高いことを明らかにした。そのことから、穂肥を止葉抽出期に施用してもコムギの窒素吸収能力は茎立期および穂揃期と同様に高く、差が認められなかったと考えられた。このため、分けつ期に施用して止葉抽出期頃から窒素が溶出するS20は、速効性窒素肥料による茎立期の穂肥と同様の効果があると推察された。

最後に、省力施肥法における配合する肥料と量を検討するために、分けつ肥として速効性窒素肥料 3 g m^{-2} とS20 9 g m^{-2} の配合肥料あるいは速効性窒素肥料 3 g m^{-2} とS20 8 g m^{-2} およびIB 1 g m^{-2} の配合肥料の2種類を供試し、生育、収量、子実タンパク質含有率に及ぼす影響を慣行の分施と比較検討した（表4-3、図4-2）。一般に、肥効調節型肥料の窒素溶出量は施肥量の80～90%であることから、配合肥料での肥効調節型肥料の窒素量は、分施の穂肥と穂揃期追肥をあわせた窒素施肥量 7 g m^{-2} に 2 g m^{-2} を増肥し、製品重量を軽量化するため分けつ肥の速効性肥料を 1 g m^{-2} 減じた。その結果、分施と比べて、速効性肥料とS20の配合肥料では、茎数、穂数が少ない傾向がみられ、窒素供給不足が考えられた。特にS20の窒素溶出が遅れた2014年播では、穂数が分施と比べて有意に少なく、窒素溶出がさらに遅れる年次では穂数不足による収量の低下が危惧される。一方、速効性肥料とS20およびIBの配合肥料では、茎数、穂数に差は認められなかった。IBは化学的加水分解により尿素に変化する肥料（藤原ら 1998）であり、施肥後の降雨によりIB由来の窒素

が加水分解され、持続的に窒素供給を行うことができる。試験を実施した3か年とも施肥後すぐに降雨があったことから、IBの配合肥料では、IBの窒素供給が始まり、速効性肥料の減肥分の窒素を補い、分施と同等の莖数、穂数を確保できたと推察される。このことから、安定的に窒素を供給し、莖数、穂数を確保するためには、速効性肥料とS20およびIBの配合肥料が望ましいと考えられる。千粒重、容積重、収量、検査等級はいずれの配合肥料とも分施と差は認められず（表4-3）、子実タンパク質含有率は、試験を実施した3か年とも12%以上を確保できた（図4-2）。

第3章の結果から、硫酸の施肥で子実タンパク質含有率12%以上を安定的に確保できる穂揃期追肥時期を穂揃期～穂揃期後7日であった。しかし、硫酸の施用後、すぐに降雨があった場合には、穂揃期後14日の追肥においても、子実タンパク質含有率12%を確保できることを確認している。また、穂孕期以降の施用窒素は子実タンパク質含有率を高める方向に働く（島崎・渡邊 2010）、出穂後10日の追肥により子実タンパク質含有率が向上する（高山ら 2004）等の報告から、子実タンパク質含有率の向上に関与するS20の窒素溶出期間は、止葉抽出期～出穂期後17～24日（埋設後60日頃～90日頃）と考えられる。S20の施用窒素量を9 g m⁻²とした場合、この期間の窒素溶出量は合計4.52～4.87 g m⁻²で、溶出率は施用した窒素の50～54%と低く、福岡県の穂揃期追肥の窒素施用量5 g m⁻²と比べて4～10%少なかった。にもかかわらず3か年とも子実タンパク質含有率12%を確保できた。これは、水稻では肥効調節型肥料の窒素利用率は、速効性肥料の窒素利用率と比べて10%程度高い（上野ら 1991）ことから、コムギにおいても窒素利用率が高いためと推察される。

以上から、中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」を適期に播種し、速効性窒素肥料3 g m⁻²とS20 8 g m⁻²およびIB 1 g m⁻²の配合肥料を分けつ肥として施用した場合、生育、収量、子実タンパク質含有率は慣行の分施と同等と判断され、穂肥および穂揃期追肥を省略した省力施肥が可能であることが明らかとなった。本配合肥料は、県内で普及しているパン用コムギ「ミナミノカオリ」へも適用でき、栽培法や播種時期が同様な北部九州において使用できると推察される。

今後は、本試験で供試したS20より溶出期間が短い肥効調節型肥料の開発が待たれる。溶出期間が短くなることで、施肥窒素の利用率が向上し、製品重量の軽量化が図られ、生産者の作業負担が軽減されることが期待される。

摘要

本研究では、中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」における慣行の追肥体系（以下、分施）である分けつ肥（1月下旬施肥、分けつ期）＋穂肥（3月上旬施肥、莖立期）＋穂揃期追肥（穂揃期施肥）の3回施肥を分けつ期のみの1回施肥とする省力施肥法を確立することを目的とした。最初に、分けつ期に施肥した肥効調節型肥料の被覆尿素シグモイド型エムコート20日タイプ（以下、S20）の生育期間別窒素溶出量およびコムギへの肥料効果を明らかにした。次に、速効性肥料と肥効調節型肥料の配合肥料が、生育、収量、品質に及ぼす影響を検討した。S20を分けつ期に埋設した場合、累積の窒素溶出量が、基準の穂肥

窒素量と同等となる時期は、基準の穂肥時期である茎立期より遅い止葉抽出期～開花期頃であった。そこで、重窒素標識硫酸を用いて、茎立期または止葉抽出期に穂肥を施肥し、穂肥由来のコムギ植物体中の窒素含有量、穂肥の施肥窒素利用率、コムギの収量、品質を調査した。その結果、穂肥由来のコムギ植物体中の窒素含有量、穂肥の施肥窒素利用率に施肥時期による差は認められず、穂数、収量、子実タンパク質含有率も同程度であった。このことから、分けつ期にS20を施肥することで穂肥として利用できると考えられた。分施の穂揃期追肥窒素量と比べると、S20の止葉抽出期～出穂期後24日頃の窒素溶出量はやや少なかった。しかし、速効性窒素肥料 3 g m^{-2} とS20 8 g m^{-2} およびIB 1 g m^{-2} の配合肥料を分けつ期に施肥した結果、子実タンパク質含有率は12%以上を確保でき、生育、収量も分施と同等であった。以上から、この施肥法は分けつ期の1回追肥で、穂肥と穂揃期追肥を省略できると判断された。

第5章 食糧用二条オオムギ「はるか二条」における施肥窒素利用率および地力窒素の寄与率

2020年3月に閣議決定された新たな「食料・農業・農村基本計画」におけるオオムギ・ハダカムギの生産努力目標は、2018年度の17万トンから2030年では23万トンと35%の増産に設定された。この目標値を達成するためには、多収品種の育成や栽培法の改良による単収の向上のみならず、作付面積の拡大が不可欠である。一方、全国における麦類の生産動向を2005年と2020年で比べると、作付農家数は37%に減少し、1戸当たりの作付面積はコムギで3.2倍、オオムギで3.7倍に拡大している（農林水産省 2008, 農林水産省 2021）。生産努力目標である35%の増産のために、1戸当たりの作付面積が更に増加することが想定され、生産者の面積拡大に対応できる省力生産技術の開発が今後ますます重要となる。コムギにおいては、軟質コムギでは田中ら（2008）、硬質コムギでは第2章および第3章の知見を基に、第4章において高品質麦生産のための子実タンパク質含有率の向上に力点を置いた省力施肥体系を確立した。食糧用二条オオムギ（オオムギ）栽培においても、生産現場から肥効調節型肥料の活用により、2回の追肥作業を1回とする省力施肥体系が求められている。

一方で、コムギと異なりオオムギでは、麦類の品質評価基準のランク区分において子実タンパク質含有率に関する基準値は定められていないため、収量の確保に力点を置いて施肥体系を構築することとなる。そのためには、オオムギ植物体中の窒素動態を把握し、施肥窒素ならびに地力から発現される窒素の吸収能を把握する必要がある。谷内・田谷（1987）は、土壌により窒素供給時期が異なり、オオムギの窒素吸収に影響を与えていることを報告しており、窒素吸収能の把握については産地ごとに実施する必要があると考える。

そこで、本章では福岡県内で栽培するオオムギに適する肥効調節型肥料の検討に必要な基礎的な知見を得るために、主力品種である「はるか二条」（河田ら 2015）を供試し、¹⁵N標識硫酸を用いて、オオムギ植物体中における基肥、分けつ肥、穂肥の各施肥に由来する窒素含有量、窒素寄与率、施肥窒素利用率および地力に由来する窒素含有量、窒素寄与率を明らかにした。

材料と方法

1. 耕種概要

オオムギ「はるか二条」を供試し、2016年と2017年（播種年、以下同じ）に福岡県農林業総合試験場豊前分場の水田圃場（土性：埴壤土、全窒素含有率 0.17%、全炭素含有率 1.87%、水稻後作）において試験を実施した。播種方法は畝幅 150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150本 m^{-2} とした。試験の規模は1区0.15 m^2 の2反復とし、2016年播は11月30日に、2017年播は11月28日に播種した。施肥時期および施肥窒素分量は、両年も基肥を播種時に硫酸（N-P₂O₅-K₂O:21-0-0）で5 g m^{-2} 施用し、2016年播は分けつ肥を1月19日、穂肥を2月28日、2017年播は分けつ肥を1月31日、穂肥を3月7日にそれぞれ4 g m^{-2}

施用した。各区とも基肥時にPK化成（0-40-40）を用いてリン酸，カリをいずれも成分量で5 g m⁻²施用した。踏圧は1月～2月に2回，土入れは1月～3月に2～3回行った。

2. 各施肥に由来する麦体中の窒素含有量と施肥窒素寄与率，施肥窒素利用率

施肥ごとに¹⁵N標識硫酸（5 atom%）を供試し，対照としてすべての施肥で非標識硫酸を処理する区を設けた。両年とも成熟期に試験区の全株を抜き取り，根を切除後，穂と茎葉の部分に分けて105℃で24時間通風乾燥し，乾物重を測定後，粉碎し窒素分析に供した。吸収¹⁵N濃度（atom% excess）は，安定同位体質量分析計（DELTA^{plus} Advantage, Thermo Fisher Scientific社）により測定した¹⁵N存在比（atom%）より自然存在比0.366を減じることで算出した。各施肥の施肥窒素寄与率は，オオムギ植物体中の¹⁵N濃度を肥料の¹⁵N濃度で除して100を乗じたものとした。窒素含有量は，オオムギ植物体の全窒素含有率をセミ・マイクロケルダール法にて測定し，乾物重を乗じることで算出した。各施肥の施肥窒素利用率は，算出した窒素含有量に各施肥の施肥窒素寄与率を乗じて各施肥由来の窒素含有量を算出し，各施肥の窒素施用量で除し，100を乗じて算出した。粗麦重を水分12.5%に換算し，子実タンパク質含有率は穂の全窒素含有率にタンパク係数5.83を乗じて算出した。なお，本試験においては，施肥した肥料以外の吸収窒素を地力由来とした。

結果

1. 気象概況とオオムギの生育概況

試験を実施した2か年の気象概況を図5-1に示した。2か年の平均気温を平年と比べると，2016年播では播種後～2月中旬で平年並～2.4℃高く，その後3月下旬までは平年並，4月上旬以降は1～2℃高く推移した。2017年播では12月上旬～2月中旬は平年並～2.1℃低く，2月下旬～4月下旬は0.5～2.2℃高く，5月上旬は0.7℃低く推移した。生育期間中（12月上旬～5月上旬）の旬ごとの降水量を平年と比べると，2016年播は12月中旬～1月上旬と2月上旬，4月上旬～中旬で多く，2017年播は1月上旬と3月上旬～中旬，5月上旬で多かった。次に「はるか二条」の生育概況を表5-1に示した。2016年播は出穂期が4月6日，成熟期が5月17日，穂数が592本 m⁻²，粗麦重が845 g m⁻²，子実タンパク質含有率が8.3%であった。2017年播は出穂期が4月10日，成熟期が5月23日，穂数が620本 m⁻²，粗麦重が888 g m⁻²，子実タンパク質含有率が9.5%で，2017年播は2016年播と比べて，出穂期が4日，成熟期が6日遅く，穂数，粗麦重に有意な差は認められず，子実タンパク質含有率は1.2ポイント高かった。

表5-1 「はるか二条」の生育概況.

播種年	出穂期 (月.日)	成熟期 (月.日)	穂数 (本 m ⁻²)	粗麦重 (g m ⁻²)	子実タンパク質 含有率 (%)
2016年	4. 6	5. 17	592	845	8.3
2017年	4. 10	5. 23	620	888	9.5
t検定	—	—	n. s.	n. s.	***

***は0.1%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし.

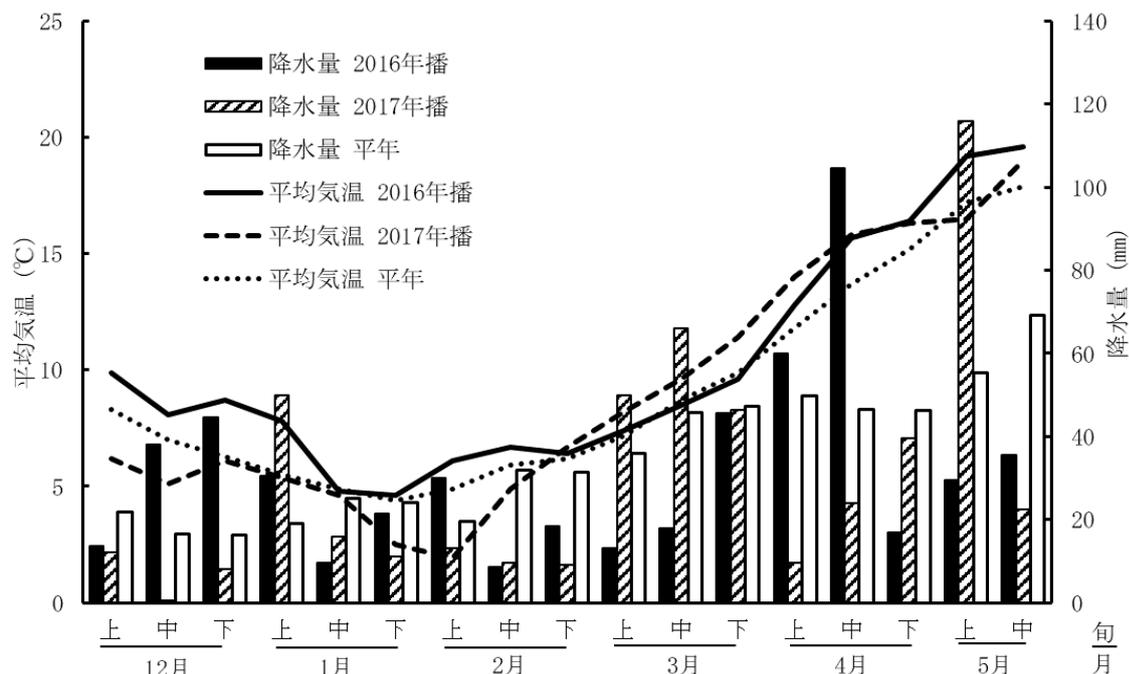


図5-1 生育期間中の気象概況 (行橋アメダス).

2. 各施肥に由来する麦体中の窒素含有量と施肥窒素寄与率, 施肥窒素利用率

成熟期における各施肥および地力に由来する麦体中の窒素含有量を図5-2に示した. 窒素含有量は, オオムギ植物体全体の12.27~12.82 g m⁻²のうち, 地力由来が4.90~5.82 g m⁻², 基肥由来が1.52~1.80 g m⁻², 分けつ肥由来が2.58~2.60 g m⁻², 穂肥由来が2.62~3.25 g m⁻²であった. 地力由来の窒素含有量は, 各施肥に由来する窒素含有量と比べて多かった. 穂肥由来の窒素含有量は, 2か年とも分けつ肥由来の窒素含有量と差は認められなかったが, 基肥由来の窒素含有量と比べると2016年播は多かった. 成熟期における子実の窒素含有量と窒素構成比は, 地力由来が4.22~5.06 g m⁻², 34.4~39.5%, 基肥由来が1.27~1.54 g m⁻², 10.4~12.0%, 分けつ肥由来が2.19~2.25 g m⁻², 17.6~17.8%, 穂肥由来が2.31~2.88 g m⁻², 18.0~23.5%で, オオムギ植物体中の窒素含有量の85%程度が子実部に含まれ, 地力を除いた施肥由来の窒素構成比の合計は54~60%であった (表5-2). 子実部の窒素含有量の由来別窒素寄与率は, 基肥由来が12.0~13.8%, 分けつ肥由来が20.2~20.7%, 穂肥由来が20.7~27.3%, 地力由来が40.0~45.3%で, 地力由来の窒素

寄与率が最も高く、分けつ肥由来と穂肥由来は同程度で、基肥由来が最も低かった（表5-3）。各施肥の窒素利用率は、基肥が30.3～35.9%，分けつ肥が64.5～65.0%，穂肥が65.5～81.4%で、基肥が最も低く、穂肥は基肥と比べると2か年とも高く、分けつ肥と比べると2016年播は高く、2017年播は同程度であった（図5-3）。

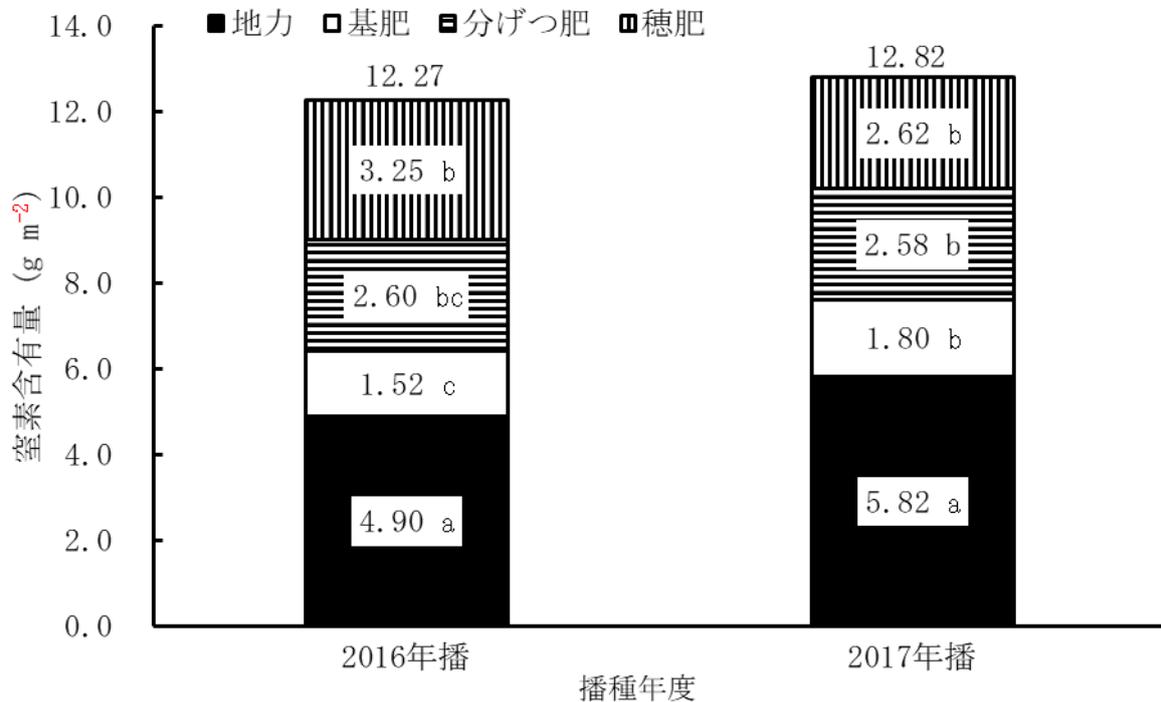


図5-2 成熟期の各施肥および地力に由来するオオムギ植物体の窒素含有量。縦棒の上部にある数値は窒素含有量の合計値。

同年播において異英字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較)。

表5-2 成熟期における由来窒素別の子実および茎葉の窒素含有量と窒素構成比。

由来窒素名	器官	窒素含有量 (g m^{-2})		窒素構成比 (%)	
		2016年播	2017年播	2016年播	2017年播
基肥	子実	1.27	1.54	10.40	12.0
	茎葉	0.25	0.26	2.0	2.0
分けつ肥	子実	2.19	2.25	17.8	17.6
	茎葉	0.41	0.33	3.3	2.6
穂肥	子実	2.88	2.31	23.5	18.0
	茎葉	0.37	0.31	3.0	2.4
地力	子実	4.22	5.06	34.4	39.5
	茎葉	0.68	0.76	5.6	5.9
小計	子実	10.56	11.16	86.1	87.1
	茎葉	1.71	1.66	13.9	12.9
総計		12.27	12.82	100	100

窒素構成比は、器官別窒素含有量を総計で除した割合。

表5-3 子実部の窒素含有量の
由来別窒素寄与率.

由来 窒素名	窒素寄与率 (%)	
	2016年播	2017年播
基肥	12.0 c	13.8 c
分けつ肥	20.7 b	20.2 b
穂肥	27.3 b	20.7 b
地力	40.0 a	45.3 a

同年播において異英字間に

5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較).

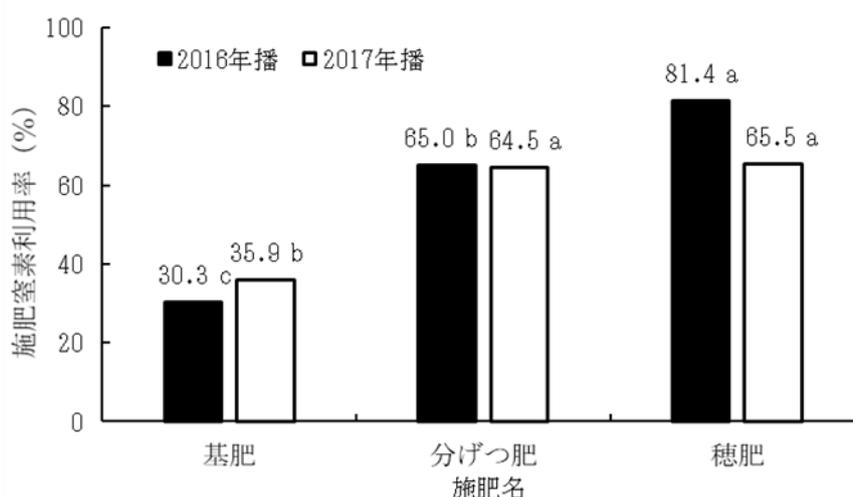


図5-3 成熟期における各施肥の施肥窒素利用率.

同年播において異英字間に 5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較).

考察

オオムギに適する肥効調節型肥料の検討に必要な基礎的な知見を得るため、福岡県の主力品種である「はるか二条」に¹⁵N標識硫酸を施用し、成熟期のオオムギ植物体中における基肥、分けつ肥、穂肥の各施肥に由来する窒素含有量、窒素寄与率、施肥窒素利用率および地力に由来する窒素含有量、窒素寄与率を明らかにした。試験を実施した2か年と比較すると、2017年播は、2016年播と比べて生育期間中の平均気温が低く、オオムギの出穂期が4日、成熟期が6日遅かった。穂数、粗麦重に差はみられなかったが、2017年播の子実タンパク質含有率は1.2ポイント高かった (図5-1, 表5-1)。コムギにおいて、子実タンパク質含有率と収量には負の相関関係が認められる (島崎・渡邊 2010)、子実タンパク質含有率は開花期以降の窒素供給により上昇する (高山ら 2004, 島崎ら 2014) 等の報告がある。また、第2章において、穂揃期以降に吸収される窒素は穂揃期追肥および地力に由来する窒素であった。これらのことから、2016年播と2017年播の粗麦重に差がないにも関わらず、子実タンパク質含有率に差が生じたのは、穂揃期以降の窒素吸収量の差によるも

のと考える。2017年播の地力に由来する窒素含有量は、2016年播と比べて 0.92 g m^{-2} 多かった(図5-2)。中華めん用コムギにおいて地力に由来する窒素含有量の18~37%が登熟初期以降に吸収されることを第2章で確認しており、地力に由来する窒素含有量の多い2017年播において、登熟初期以降に窒素供給が多く、子実タンパク質含有率が高まったと推察される。本試験において精麦品質を確認していないが、オオムギは子実タンパク質含有率が高くなると、搗精時間や精麦白度に負の影響をもたらす(菅ら 1962, 久保田ら 1991, 水上・小林 1993)ことが報告されており、将来的にオオムギにおける肥効調節型肥料を活用した省力施肥法を確立する際には、子実タンパク質含有率の過度の上昇を抑制するために、開花期以降に窒素溶出のない種類の肥料を選択することが望ましい。

オオムギ植物体中の窒素含有量は、2016年播が 12.27 g m^{-2} 、2017年播が 12.82 g m^{-2} で、2か年とも地力由来の窒素含有量が他の施肥由来の窒素含有量と比べて有意に多く、窒素寄与率も高かった(図5-2, 表5-3)。この結果は、オオムギの窒素供給における地力の重要性を示唆している。試験を実施した圃場は地力が中庸であったが、地力の低い圃場において安定的に収量を確保するためには、有機物等の施用により有機態窒素含量を増加させ、オオムギの窒素含有量を向上させることが有効であると考えられる。各施肥由来の窒素含有量は、2016年播では穂肥由来の窒素含有量が 3.25 g m^{-2} で、基肥由来の窒素含有量と比べて有意に多く、分けつ肥由来の窒素含有量と同程度であったが、2017年播ではいずれの施肥とも有意な差は認められず(図5-2)、2か年で異なる傾向がみられた。この要因は、2016年播と比べて2017年播の穂肥由来の窒素含有量が 0.63 g m^{-2} 少ないことによると考えられる。穂肥の施用時期は、2016年播が2月28日、2017年播が3月7日であり、両年の3月上~中旬の降水量を平年と比べると、2016年播では36~39%と少なく、2017年播では139~144%と多かった(図5-1)。興津・本多(1982)は、窒素肥料は土壤に施されると硝化作用により $\text{NO}_3\text{-N}$ となり作物に吸収されやすくなるが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は陰イオンのため、土壤に保持されにくく、雨水とともに溶脱しやすいと述べている。2017年播は穂肥施用後の降雨が多く、施用した窒素が溶脱して吸収できなかったことから、穂肥由来の窒素含有量が減少したと推察される。そのため、穂肥に由来する窒素含有量の容量は、溶脱の影響を受けなかった2016年播の窒素含有量に相当すると判断できる。各施肥の施肥窒素利用率は、2か年とも基肥が最も低く、2016年播では穂肥が最も高く、2017年播では分けつ肥と穂肥は同程度であった(図5-3)。施肥窒素利用率においても2か年で異なる傾向がみられた要因は、降雨の影響による穂肥由来の窒素含有量の低下に起因すると考えられる。そのため、穂肥の施肥窒素利用率は、降雨の影響が小さい2016年播の81.4%に近い水準と考えられ、他の施肥と比べて高いと判断される。成熟期における窒素含有量は、由来窒素によらず子実に多く、子実部の窒素構成比は86~87%であった(表5-2)。成熟期の子実部の窒素構成比は、日本めん用コムギでは70%(木村ら 2001)、中華めん用コムギでは87~89%であることを第2章で明らかにしており、オオムギの窒素構成比は中華めん用コムギと同程度に高いことが明らかとなった。島崎・渡邊(2010)は、コムギにおいてシンク容量が決まっていない生育前期の窒素施用は主に収量に影響し、シンク容量が決定した後の追肥は子実タンパク質含有率を高めるとしている。オオムギの施肥体系は、基肥と分けつ肥お

よび穂肥，すなわち収量を高める生育前期の体系である．本試験において，成熟期における地力を除いた施肥に由来する子実の窒素構成比の合計が54～60%であることから，省力施肥体系を構築する際には，生育前期に窒素を溶出し，生育後期に窒素を溶出しない肥効調節型肥料を選定することで，子実タンパク質含有率の上昇を伴わず，収量が安定的に確保できると考えられる．

摘要

食糧用二条オオムギにおける省力施肥体系を構築するために， ^{15}N 標識硫酸を用いて，オオムギ植物体中の地力および各施肥に由来する窒素含有量と窒素寄与率，各施肥に由来する窒素利用率を明らかにした．基肥 5 g m^{-2} に由来する窒素含有量は $1.52\sim 1.80\text{ g m}^{-2}$ ，分けつ肥 4 g m^{-2} に由来する窒素含有量は $2.58\sim 2.60\text{ g m}^{-2}$ ，穂肥 4 g m^{-2} に由来する窒素含有量は $2.62\sim 3.25\text{ g m}^{-2}$ ，地力に由来する窒素含有量は $4.90\sim 5.82\text{ g m}^{-2}$ で，地力に由来する窒素含有量は各施肥に由来する窒素含有量と比べて多かった．子実含有窒素における窒素寄与率は，基肥が12～14%，分けつ肥が20～21%，穂肥が21～27%であったのに対して，地力は40～45%と最も高く，地力に由来する窒素の重要性が示唆された．各施肥の窒素利用率は，基肥が30～36%と最も低く，分けつ肥は65%，穂肥は66～81%と追肥で高かった．成熟期におけるオオムギ植物体中の子実部の窒素構成比は86～87%で，そのうち54～60%が施肥に由来する窒素であった．オオムギの施肥は生育前半に施用する体系であり，子実部の施肥に由来する窒素構成比が54～60%と高いことから，省力施肥体系の構築にあたっては，生育前半に窒素が溶出する肥効調節型肥料を選定することで，収量が安定的に確保できると考えられる．なお，総窒素施肥量 13 g m^{-2} に対して，成熟期でのオオムギ植物体中の全窒素含有量は $12.27\sim 12.82\text{ g m}^{-2}$ であった．

第6章 食糧用二条オオムギにおける肥効調節型肥料を活用した穂肥が省略できる省力施肥法

国内における麦類の生産動向は、1戸当たりの作付面積は拡大し、今後も作付面積の拡大が想定される。規模拡大に伴う作業時間の増加により、ムギの生育に対応した的確な栽培管理が実施できないことが懸念され、省力生産技術の開発が急務であり、中でも、施肥管理における追肥作業は、ムギの生育ステージにあわせた施用をしなければならないことから、省力施肥技術の開発が重要である。オオムギの追肥体系は、分けつ肥+穂肥の2回体系で、オオムギでは子実タンパク質含有率が高まると、搗精時間や精麦白度に負の影響をもたらす（菅ら 1962, 久保田ら 1991, 水上・小林 1993）ため、子実タンパク質含有率の向上に力点をおいたコムギの省力施肥法は適さず、オオムギ生産に適する穂肥が省略できる省力施肥法の開発が求められた。

第5章において、福岡県の主力品種である「はるか二条」（河田ら 2015）を供試し、基肥+分けつ肥+穂肥の分施肥体系における成熟期の子実部の窒素寄与率のうち、41~48%が追肥に由来することを明らかにし、省力施肥法を開発する際には、シンク容量が決まっている生育前期に窒素を溶出する肥効調節型肥料の施用が、子実タンパク質含有率の上昇を伴わず、収量を安定的に確保するうえで有効であると考えた。この結果を基に、本章では、穂肥が省略できる省力施肥法に適する肥効調節型肥料の溶出パターンと窒素溶出タイプを解明し、解明した肥効調節型肥料を活用した施肥法が、オオムギの生育、収量、品質へ与える影響を検証した。

材料と方法

試験1. 速効性肥料および肥効調節型肥料に由来する麦体中の窒素含有量と施肥窒素寄与率、施肥窒素利用率

オオムギ「はるか二条」を供試し、2017年に福岡県農林業総合試験場豊前分場の水田圃場（土性：埴壤土、全窒素含有率 0.17%、全炭素含有率 1.87%、水稻後作）において試験を実施した。播種方法は、畝幅150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150本 m^{-2} とした。試験の規模は、1区0.15 m^2 の2反復とし、2017年11月28日に播種した。基肥に非標識硫酸 ($N-P_2O_5-K_2O:21-0-0$) と ^{15}N 標識硫酸 (5 atom%) を窒素成分で5 g m^{-2} 、追肥として2018年1月31日に、非標識硫酸と ^{15}N 標識硫酸、リニア型20日溶出タイプ被覆尿素 (LPコート20, ジェイカムアグリ) のうち非標識のタイプ (42-0-0, 以下, LP20) と重窒素標識のタイプ (40-0-0, 3.2 atom%, 以下, ^{15}N 標識LP20), リニア型30日溶出タイプ被覆尿素 (LPコート30, ジェイカムアグリ) のうち非標識のタイプ (42-0-0, 以下, LP30) と重窒素標識のタイプ (40-0-0, 3.2 atom%, 以下, ^{15}N 標識LP30) およびイソブチルアルデヒド縮合尿素 (以下, IB) (33-0-0) を施用し、対照として、すべての施肥で非標識硫酸を処理する区を設けた (表6-1)。また、播種時にPK化成 (0-40-40) を用いてリン酸、カリをいずれも成分量で5 g m^{-2} 施用した。踏圧を2月に2回、土入れを1月~3月に3回行った。乾物重は、穂揃期 (4月16日) および成熟期に試験区の全株を抜き取り、根を切除後、穂

と茎葉の部分に分けて105°Cの24時間通風乾燥で求めた。吸収¹⁵N濃度 (atom% excess) は、安定同位体質量分析計 (DELTA ^{plus} Advantage, Thermo Fisher Scientific) により測定した¹⁵N存在比 (atom%) より自然存在比0.366 atom%を減じて算出した。各施肥の施肥窒素寄与率は、オオムギ植物体中の¹⁵N濃度を肥料の¹⁵N濃度で除して100を乗じたものとした。窒素含有量は、セミ・マイクロケルダール法で測定したオオムギ植物体の全窒素含有率に、乾物重を乗じて算出した。各施肥の施肥窒素利用率は、算出した窒素含有量の非標識区を含む各処理区の平均値に各処理区の施肥窒素寄与率を乗じて、各施肥由来の窒素含有量を算出し、各施肥の窒素施用量で除し、100を乗じて算出した。各施肥由来の窒素含有量の平均値を積算して、総窒素含有量からの差引量をIBおよび地力由来量とした。粗麦重は水分12.5%に換算し、子実タンパク質含有率は、穂の全窒素含有率にタンパク係数5.83を乗じて算出した。

表6-1 ¹⁵N標識肥料の試験区の構成.

試験区	基肥 硫安	追肥			
		硫安	LP20	LP30	IB
¹⁵ N標識肥料	5*	4	1	1	2
	5	4*	1	1	2
	5	4	1*	1	2
	5	4	1	1*	2
対照	5	4	1	1	2

数値は、m²当たり窒素施用量 (g).

分けつ肥施用時に追肥.

*は、¹⁵N標識肥料を示す.

試験2. LP20を活用した追肥1回体系とオオムギの生育、収量、品質

オオムギ「はるか二条」を供試し、2015～2018年播の4か年、前述の試験と同一圃場で試験を実施した。播種方法は畦幅150 cmの4条の条播で、目標出芽本数を150本 m⁻²とした。試験の規模は1区8.3 m²の3反復で、11月27～30日に播種した。福岡県の施肥基準（福岡県農林水産部経営技術支援課 2018）に基づき、慣行分施肥区は、基肥（播種直後施肥）に速効性の化成肥料（N-P₂O₅-K₂O:16-16-16）を窒素、リン酸、カリの成分でそれぞれ5, 5, 5 g m⁻²を施用し、追肥に速効性肥料（16-0-16）を分けつ肥（茎立期、1月中～下旬施肥）に窒素、リン酸、カリの成分で 4, 0, 4 g m⁻²、穂肥（茎立期、2月中旬～3月上旬施肥）に 2, 0, 2 g m⁻²を施用した。追肥1回体系区は、試験1の結果、LP20が省力施肥に適すると明らかとなったこと、第4章の結果より、硬質コムギにおいてIBの配合により茎数および穂数が安定的に確保できたことから、供試する肥効調節型肥料をLP20およびIBとした。基肥（播種直後施肥）は、慣行分施肥区と同様に速効性の化成肥料を窒素、リン酸、カリの成分で5, 5, 5 g m⁻²を施用し、分けつ肥（分けつ期、1月下旬施肥）時に、速効性肥料（16-0-16）を窒素、リン酸、カリの成分でそれぞれ 4, 0, 4 g m⁻²ずつ施用し、窒素成分にはLP20とIBを用いた。LP20由来の窒素利用率が試験1において穂揃期で58%であっ

たことから、LP20を3 g m⁻²とIBの1 g m⁻²をあわせて4 g m⁻²とし、慣行分施区の穂肥2 g m⁻²に比べて増肥した。踏圧は1～2月に2回、土入れは1月～3月に3回行った。収穫後、天日乾燥舎で子実水分12%程度まで乾燥させ、収量調査を行った。容積重はブラウエル穀粒計で測定し、子実タンパク質含有率はインフラテック1241で測定（無水分）した。搗精試験は、原麦150 gを試料とし、試験用搗精機（TM-05、サタケ）を用いて、ロール粒度36番、ロール回転数1150 rpmの条件で、55%歩留一定搗精を行い、搗精時間、搗精白度を調査した。精麦白度は、玄米・精米白度計（C-6001-1、ケツト科学研究所）を用いて測定した。硝子率は、九州地域麦類品質評価協議会に調査を委託した。

結果

試験1. 速効性肥料および肥効調節型肥料に由来する麦体中の窒素含有量と施肥窒素寄与率、施肥窒素利用率

穂揃期と成熟期における各肥料および地力に由来するオオムギ植物体中の窒素含有量を図6-1に示した。穂揃期の窒素含有量は、基肥硫安由来が1.58 g m⁻²、追肥硫安由来が2.35 g m⁻²、LP20由来が0.58 g m⁻²、LP30由来が0.35 g m⁻²、地力とIB由来が5.47 g m⁻²であった。成熟期の窒素含有量は、基肥硫安由来が1.87 g m⁻²、追肥硫安由来が2.55 g m⁻²、LP20由来が0.80 g m⁻²、LP30由来が0.69 g m⁻²、地力とIB由来が6.48 g m⁻²であった。穂揃期および成熟期における肥効調節型肥料の施肥窒素利用率は、穂揃期ではLP20が58%、LP30が35%とLP20が有意に高く、成熟期ではLP20が80%、LP30が69%で有意な差は認められなかった（図6-2）。

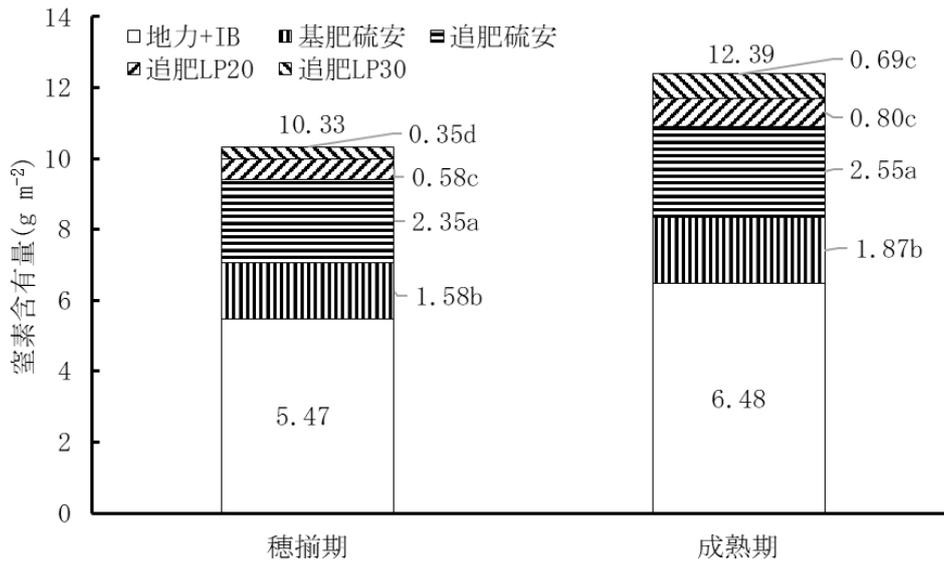


図6-1 穂揃期と成熟期における各肥料および地力に由来するオオムギ植物体中の地上部窒素含有量（2017年播）.

非標識区を含む各処理区の窒素含有量の平均値に，反復ごとに各処理区の施肥窒素寄与率を乗じて，各施肥由来の窒素含有量を算出した．

縦棒の上部にある数値は窒素含有量の合計値．

同ステージにおいて異英字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較) ．

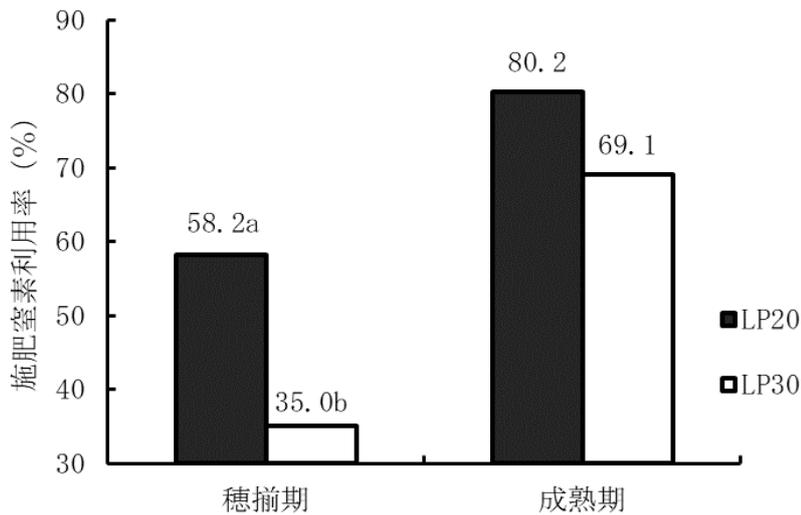


図6-2 穂揃期および成熟期におけるLP20とLP30の施肥窒素利用率 (2017年播) .

同ステージにおいて異英字間に5%水準で有意差あり (t検定) .

試験2. LP20を活用した追肥1回体系とオオムギの生育，収量，品質

追肥1回体系が「はるか二条」の生育，収量，品質に及ぼす影響を表6-2および表6-3に示した．施肥法では，慣行分施肥区と比べて，追肥1回体系区の生育，収量は，出穂期は同日で，成熟期は1日遅かった．茎数，稈長，穂長，倒伏程度，容積重に有意な差は認められず，千粒重が0.7 g重く，精麦重は582 g m⁻²と5%程度多かった．品質では，子実タン

パク質含有率が0.7ポイント高かったが、検査等級は1等と良好で、搗精時間、精麦白度に有意な差は認められなかった。硝子率は、両区とも50%程度であった。生産年次により、生育、収量、品質に有意な差は認められたが、施肥法との交互作用は認められなかった。

表6-2 省力施肥法がオオムギの生育、収量に及ぼす影響。

試験区	茎数 本 m ⁻²	出穂期 月日	成熟期 月日	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本 m ⁻²	倒伏 程度	千粒 重 g	容積 重 g L ⁻²	精麦 重 g m ⁻²
追肥1回	1022	4月3日	5月17日	87	6.7	675	0.8	49.0	746	582
慣行分施	992	4月3日	5月16日	86	6.7	670	0.7	48.3	744	554
施肥法	n. s.	—	—	n. s.	n. s.	n. s.	—	*	n. s.	*
年次	**	—	—	**	**	**	—	**	**	**
交互作用	n. s.	—	—	n. s.	n. s.	n. s.	—	n. s.	n. s.	n. s.

2015～2018年播の4か年の平均値。

倒伏程度は傾斜程度により、0（無）、1（微）、2（少）、3（中）、4（多）、5（甚）の6段階で示した。

千粒重、精麦重は水分12.5%換算、容積重の水分換算は行っていない。

**, *は各々1%, 5%水準で有意(二元配置の分散分析)。

表6-3 省力施肥法がオオムギの品質に及ぼす影響。

試験区	子実の ^パ ク質 含有率 (%)	搗精 時間 (秒)	検査 等級	精麦 白度	硝子 率 (%)
追肥1回	11.9	386	2.3	43.7	49.8
慣行分施	11.2	397	2.0	43.8	52.0
施肥法	**	n. s.	—	n. s.	—
年次	**	**	—	**	—
交互作用	n. s.	n. s.	—	n. s.	—

2015～2018年播の4か年の平均値。

搗精時間および精麦白度は55%搗精。

検査等級は、1（1等上）、2（1等中）、3（1等下）、

4（2等上）、5（2等中）、6（2等下）の6段階で示した。

**, *は各々1%, 5%水準で有意(二元配置の分散分析)。

考察

オオムギ生産において、肥効調節型肥料の活用により穂肥を省略し、分けつ肥の1回のみとする省力施肥法を構築するには、肥効調節型肥料の溶出パターンと窒素溶出タイプの選定が重要と考える。生育前半の窒素供給がオオムギの収量確保に有効であることを第5章において明らかにしたことから、本試験において供試する肥効調節型肥料の溶出パターンは、施用後速やかに窒素溶出が始まるリニア型が適すると考えられた。窒素溶出タイプ

は、複数あるタイプの中から短期間で窒素を溶出する20日タイプと30日タイプの二つを選定して、¹⁵N標識LP20および¹⁵N標識LP30を供試し、両肥料に由来するオオムギ植物体中の窒素含有量および施肥窒素利用率を比較した。窒素含有量は、穂揃期では、LP30由来が0.35 g m⁻²であったのに対し、LP20由来は0.58 g m⁻²と有意に多かった。一方、成熟期ではLP30由来とLP20由来との間には有意な差は認められず、同程度であった（図6-1）。施肥窒素利用率は、穂揃期では、LP30由来が35%で、LP20由来が58%と有意に高かったが、成熟期ではLP30とLP20との間には有意な差は認められなかった（図6-2）。穂揃期でLP20由来の窒素含有量、施肥窒素利用率が高かった要因は、LP20は、窒素溶出期間が短期間に設定されていることに起因する施用後～穂揃期の窒素溶出量が多かったことによると考える。コムギにおいて島崎・渡邊（2010）は、シンク容量が決まっていない穂孕み期より前の窒素供給は、収量を高める効果があると述べており、生育前半に窒素溶出量が多いLP20が、LP30と比べて収量を確保するうえで、オオムギの省力施肥法に適すると考える。

次に、分けつ肥施用時にLP20、IBおよび速効性肥料の配合肥料を施用した追肥1回区と慣行分施肥区を生育や収量、品質の面から比較した。生育は、慣行分施肥区に比べて、茎数、稈長、穂長、穂数に差が認められず、増肥したにも関わらず、品質低下を引き起こす要因の一つである倒伏程度は、同程度の軽微であった（表6-2）。両区において生育に差が認められなかったのは、穂揃期までに吸収された窒素量によると考える。穂揃期における施肥窒素利用率は、LP20が58%（図6-2）で、第5章の結果より、分施における穂肥の施肥窒素利用率は80%程度であることから、穂揃期までに吸収された窒素量は、施用量と施肥窒素利用率をそれぞれ乗じた1.74 g m⁻²と1.60 g m⁻²程度と推定され、生育が同等であったと考えられた。出穂期は同日で、成熟期は2日遅い年次もあったが、4か年の平均で1日遅かった。オオムギは、黄熟期～収穫期の降雨により退色粒の雨害が発生する（甲斐ら2012）。このため、雨害を回避するうえで成熟期が遅延しないことが望ましい。しかし、本試験における成熟期は5月中旬であり、北部九州の平年の入梅が6月4日頃（気象庁2022）であることを考慮すると、成熟期の1～2日程度の遅れは許容できうる。収量は、千粒重が0.7 g重かったことから5%程度多収であった。コムギでは、穂孕み期や開花期に追肥すると千粒重が重くなり、収量が向上する（Cassman 1992, 谷口ら 1999）ことが報告されており、本試験における追肥1回区の増収要因も、穂揃期以降に溶出したLP20に由来する窒素を吸収したことおよび追肥量の増肥により、千粒重が重くなったためと考えられる。品質では、子実タンパク質含有率が0.7ポイント高まったにもかかわらず、搗精時間、精麦白度に差は認められなかった（表6-3）。搗精時間は千粒重と密接に関係しており、穀粒が大きいほど搗精時間が短くなることが知られている（塔野岡ら 2010）。追肥1回体系区で子実タンパク質含有率が高かったものの、搗精時間に差が認められなかった要因としては、千粒重が重かったことによると考える。

以上、分けつ肥に肥効調節型肥料LP20を用いた速効性肥料およびIBとの配合肥料の施用は、慣行の分施肥区と同等の生育、収量、品質を生産年に左右されず安定して確保できたことから、穂肥を省略できる省力施肥法である。

摘要

食糧用二条オオムギ（オオムギ）において、穂肥が省略できる省力施肥法を確立するために、適する肥効調節型肥料の解明と肥効調節型肥料を活用した分けつ時の追肥1回施用体系の検討を行った。窒素溶出期間が異なる二つの¹⁵N標識リニア型タイプを供試し、穂揃期および成熟期における二つのリニア型タイプ（LP）に由来するオオムギ植物体中の窒素含有量および施肥窒素利用率を明らかにした。穂揃期では、二つのLP肥料に由来する窒素含有量は、30日溶出タイプ（LP30）由来が 0.35 g m^{-2} に対し、20日溶出タイプ（LP20）由来は 0.58 g m^{-2} と有意に多く、施肥窒素利用率もLP20由来が有意に高かった。一方、成熟期では、窒素含有量と施肥窒素利用率に有意な差は認められなかった。穂揃期の含有窒素量の多少は収量に影響を与えることから、穂揃期において窒素含有量が多く、施肥窒素利用率の高かったLP20の方が、オオムギの省力施肥に適する肥効調節型肥料と判断された。

次に、分けつ肥施用時にLP20を活用した追肥1回施用体系におけるオオムギの生育、収量、精麦適性を検討した。その結果、慣行分施区と比べて出穂期は同日で、成熟期は1日遅く、倒伏程度は同程度の軽微であった。収量は、千粒重の向上により5%優れた。子実タンパク質含有率は高かったが、精麦適性は同等であった。これらのことから、分けつ時の肥効調節型肥料LP20による追肥1回施用体系は、穂肥を省略できる省力施肥法であることが実証された。

第7章 総合考察

わが国における麦類の生産動向として、現在、大規模農家への施策の集中や生産コストの低減、作業の効率化等の観点から、麦作農家の作付面積の規模拡大が進んでいる。規模拡大に伴う作業時間の増大により、生産現場からは収量の向上と安定化とともに作業の省力化が求められている。なかでも、ムギ類の生育、収量、品質に多大な影響を及ぼす追肥作業の省力化が要望されている。その一方で、実需者からは、加工用途別の品質評価基準に基づいた用途に応じた高品質麦類の生産が求められている。したがって、省力化を目的とした追肥体系の構築に際しては、麦類の加工用途に応じた高品質麦類生産が前提となる。これまで、ムギ類の省力施肥高品質安定生産に関しての多くは、コムギの子実タンパク質含有率を高めるための施肥法や、肥効調節型肥料を活用した施肥法等とムギ類の収量、品質を検討したものである。地力および施肥に由来する窒素のムギ植物体中における吸収動態に基づいた省力施肥体系を前提とする高品質麦生産技術については未検討であった。このため、ムギ類の収量、品質を技術的に向上させるのに必要な省力施肥体系の理論的根拠を得るのに立ち遅れ、省力栽培技術体系の確立への支障となっている。

本研究では、以上のような背景と観点から、麦類の高品質安定生産技術を前提とした省力施肥体系を確立するために、重窒素標識硫安（以下、 ^{15}N 標識硫安）を利用することで、硬質コムギおよび食糧用二条オオムギのムギ植物体中における施肥および地力に由来する窒素の吸収動態を明らかにし、効率的な窒素の吸収を根拠とする省力栽培技術体系を検討した。

まず、硬質コムギにおける窒素吸収動態を調査した。コムギへの効率的な窒素供給のためには、分施栽培におけるコムギ植物体中の窒素動態ならびに子実窒素含有量における施肥窒素の利用率および地力窒素（地力）の寄与率を把握する必要がある。コムギ植物体中の窒素構成比は、登熟初期では茎葉が78～83%で、子実が17～22%と茎葉で高かったが、登熟後期では茎葉が11～13%で、子実が87～89%となり、茎葉に蓄積された窒素の大半は、登熟期間中に子実へ集積した。登熟初期のコムギ植物体中の窒素含有量が多い年次は、窒素含有量の少ない年次と比べて、子実タンパク質含有率が高く、多収であった。このため、高品質麦生産にとっては、茎葉中の窒素含有量を高めることが効果的である。子実窒素含有量における窒素寄与率（各施肥および地力に由来する窒素含有量を子実窒素含有量で除した割合）は、施用窒素で51～59%であったのに対し、地力が41～49%であった。「イネは土でとり、ムギは肥料でとる」との格言があるが、本試験の結果、コムギにおいても地力の影響が大きく、堆肥等の投入による土づくりの重要性が明らかとなる。コムギ植物体中の施肥ごとの施肥窒素利用率（コムギ植物体中の各施肥に由来する窒素含有量を各施肥の窒素施用量で除した割合）は、基肥が15～20%と最も低く、分けつ肥は37～56%、穂肥および穂揃期追肥が67～74%と高かった。このため、効率的な施肥体系を実施するうえで、施肥窒素利用率の低い基肥量は削減する必要がある。

追肥回数の削減による省力施肥法としては、速効性肥料と肥効調節型肥料の配合肥料を分けつ肥時に施用する省力施肥体系を考案した。本体系は、慣行の分けつ肥（1月下旬施用、分けつ期）＋穂肥（3月上旬施用、茎立期）＋穂揃期追肥（穂揃期施用）の3回施用に

対して、分けつ期のみ1回施用とする体系である。分けつ肥として速効性肥料、穂肥および穂揃期追肥として肥効調節型肥料を活用する施肥体系で、追肥作業の中でも最も労力のかかる穂揃期追肥が省略できるだけでなく、追肥回数も3回施用から1回施用へと大幅に削減できる。

肥効調節型肥料には、直線（リニア）型やS字（シグモイド）型、放物線型といった窒素溶出パターンと窒素溶出期間が異なる溶出タイプがある。また、肥効調節型肥料の窒素溶出の特徴は、速効性肥料は施用後に短期間で溶出するのに対し、肥効調節型肥料は一定期間を経て窒素の溶出が始まり、その後一定期間にわたって窒素の溶出が継続することである。この窒素溶出の特徴を活用した穂肥および穂揃期追肥を省略する本体系に適する肥効調節型肥料の溶出パターンと溶出タイプを解明するには、生育期と穂揃期後のコムギの窒素吸収動態を明らかにする必要がある。本研究において、分施栽培における慣行の穂肥施用時期である茎立期および穂揃期追肥時期である穂揃期の施肥窒素利用率が、67～74%と高いことを明らかにした。茎立期と穂揃期のほぼ中間である止葉抽出期頃の窒素施用が、コムギの生育、収量、子実タンパク質含有率、施肥窒素利用率に与える影響を調査することは、生育期の窒素吸収動態の把握につながると考える。そこで、分施栽培において止葉抽出期に窒素を施用した結果、登熟後期における施肥窒素利用率は約65%であり、茎立期の窒素施用と同等で、穂数、収量に差は認められず、子実タンパク質含有率は実需者が求める12%以上であった。このことから、止葉抽出期の窒素施用は、茎立期の窒素施用と同等の効果があることが明らかとなり、さらに穂揃期の窒素施用における施肥窒素利用率とも同程度であることから、茎立期～穂揃期の生育期間中の施肥窒素利用率は、65～70%程度であると考えられる。

穂揃期後のコムギの窒素吸収動態を明らかにするために、穂揃期、穂揃期後7日、穂揃期後14日、穂揃期後21日、穂揃期後28日に穂揃期追肥を施用した。成熟期において、穂揃期追肥に由来する子実の窒素含有量は、穂揃期が 3.4 g m^{-2} 、穂揃期後7日が 3.3 g m^{-2} と同程度で、穂揃期後14日では 1.8 g m^{-2} 、穂揃期後21日、穂揃期後28日では 0.6 g m^{-2} 以下と少なかった。子実における施肥窒素利用率は、穂揃期後の追肥時期と有意な負の関係が認められ、穂揃期後および穂揃期後7日の追肥で60%以上と高いものの、穂揃期後14日では32.5%と低下し、穂揃期後21日および28日では著しく低下した。同様に、穂揃期後の追肥時期と施肥窒素寄与率においても、有意な負の相関が認められ、成熟期の施肥窒素寄与率は、穂揃期および穂揃期後7日では30%程度と高く、穂揃期後14日以降は追肥時期が遅れるほど低下した。これらの要因により、硬質コムギの品質評価として最も重要な子実タンパク質含有率は、穂揃期および穂揃期後7日で13%以上、穂揃期後14日、穂揃期後21日、穂揃期後28日では12%未満であり、安定して子実タンパク質含有率を確保できる穂揃期追肥の施用時期は、穂揃期および穂揃期後7日であった。

本体系において施用する肥効調節型肥料を検討した。分けつ肥として速効性肥料を配合するため、肥効調節型肥料の溶出パターンは、施用後一定期間窒素の溶出を抑制するシグモイド型、溶出タイプは、茎立期頃～穂揃期頃に窒素が溶出するよう、溶出が最も早く始まる20日タイプとし、これらの条件を満たす被覆尿素シグモイド型20日（S20）を選定し

た．S20の窒素溶出の推移を把握するため，省力施肥体系で施用する時期である分けつ期にS20を埋設し，概ね15日ごとの窒素溶出率を調査し，窒素溶出量を算出した．S20の窒素溶出の推移は，茎立期以降に始まり，止葉抽出期頃から増加，穂揃期以降にさらに増加した．分施栽培において，茎立期と止葉抽出期における窒素施用効果が同等であること，茎立期～穂揃期の施肥窒素利用率は70%程度と高いことから，止葉抽出期に窒素溶出が増加するS20は，コムギ生育期の窒素供給に合致していると考えられる．また，S20は穂揃期以降も窒素溶出が継続しており，穂揃期追肥の効果もあると判断される．

肥効調節型肥料としてS20を選定したことから，速効性肥料との配合肥料を検討した．シグモイド型の窒素溶出は，地温の高低により溶出の推移が変動するため，平年と比べて低温年では窒素溶出が遅れることが危惧される．そこで，生産年次を問わず高品質安定生産を可能とするために，加水分解型のイソブチルアルデヒド縮合尿素（IB）の配合もあわせて検討した．その結果，分施体系と比べて，速効性肥料およびS20を配合した省力施肥体系では，穂数が減少する年次があり，安定生産に不安が残った．一方，速効性肥料およびS20とIBを配合した省力施肥体系では，分施体系と同等のコムギの生育，収量，子実タンパク質含有率の安定した確保が可能で，追肥回数を3回から1回へ削減できる高品質安定栽培技術である（図7-1）．

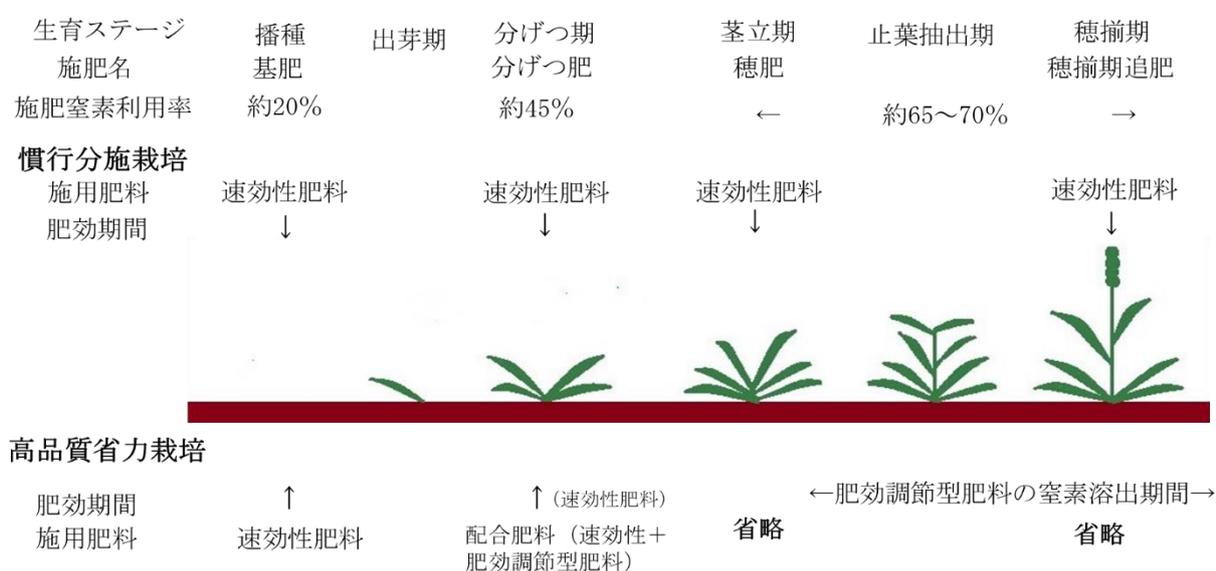


図7-1 慣行分施栽培と高品質省力施肥法の施用時期と回数，肥効期間（硬質コムギ）

食糧用オオムギ（オオムギ）は，コムギと比べて成熟期が早いことから，収穫作業の作業分散が可能であり，ムギ栽培の規模拡大に伴い，多くの生産者がオオムギとコムギの両麦種を栽培している．しかし，両麦種とも分けつ肥と穂肥の施用が概ね同時期となり，オオムギ栽培においても省力施肥体系の構築が要望されている．オオムギは，コムギとは異なり，子実タンパク質含有率が高まると，搗精時間や精麦白度に負の影響をもたらす．このため，子実タンパク質含有率の向上に力点を置いた硬質コムギの省力施肥体系は適さず，オオムギに適する高品質麦生産を前提とした省力施肥体系を構築

する必要がある。

まず、オオムギへ効率的に窒素を供給するための基礎的知見を得るため、分施栽培において、子実窒素含有量における施肥窒素の利用率および地力の寄与率を調査した。子実窒素含有量における窒素寄与率は、地力が40～45%で、施肥窒素が55～60%と、硬質コムギと同様に地力の寄与率も高い。オオムギにおいても、子実窒素含有量における地力の寄与率が高いことから、ムギ類の栽培における地力の重要性が再認識された。施肥ごとの施肥窒素利用率は、基肥が30～36%と低く、分けつ肥と穂肥は65～81%と高かった。基肥の施肥窒素利用率が低いことから、基肥量の削減が必要であるものの、硬質コムギと比べるとオオムギの施肥窒素利用率は10～20ポイント高いことから、過度な削減とならないよう留意する。成熟期におけるオオムギ植物体中の窒素構成比は、子実で86～87%、茎葉で13～14%と子実で高く、子実窒素含有量に占める施肥由来の窒素含有量の比率は50%程度であった。コムギでは、出穂期以前に吸収した窒素は収量に、出穂期以降に吸収した窒素は子実タンパク質含有率に影響を及ぼす。オオムギにおける窒素施用は、出穂期以前のみであり収量に影響を及ぼす。このため、窒素施用量を増やし、施肥に由来する窒素含有量の増加および子実窒素含有量に占める施肥由来の窒素の比率を高めることは、収量を向上させるうえで重要である。しかし、出穂期以前の過剰な窒素施用は、茎数、穂数、耐倒伏性等に影響を及ぼす。特に、穂肥の窒素施用量を増やすことは、耐倒伏性の低下につながり、倒伏による品質低下が危惧されるため、施用量の検討に際しては、耐倒伏性を考慮することが重要である。

オオムギの高品質安定生産は、子実タンパク質含有率を高めずに、外観品質および収量を向上させることである。そのため、オオムギの高品質安定生産を前提とした省力施肥体系の構築に際しては、肥効調節型肥料の窒素溶出時期は出穂期以前とし、出穂期以降の溶出を極力抑えることが重要である。硬質コムギと同様に、肥効調節型肥料と速効性肥料の配合肥料を分けつ肥時に施用し、慣行の分けつ肥（1月下旬施肥，分けつ期）＋穂肥（3月上旬施肥，茎立期）の2回施用を分けつ期のみ1回施用とする体系を考案した。施用する肥効調節型肥料は、溶出パターンとして、施用後に窒素の溶出が速やかに始まるリニア型を選定した。溶出タイプは、短期間で溶出する20日タイプと30日タイプとし、被覆尿素リニア型20日（LP20）、および被覆尿素リニア型30日（LP30）の¹⁵N標識リニア型タイプを活用して、それぞれの肥料に由来するオオムギ植物体中の窒素含有量および施肥窒素利用率を比較した。穂揃期における窒素含有量は、LP20に由来する窒素含有量が有意に多く、施肥窒素利用率も有意に高かった。成熟期では両肥料の間に有意な差は認められず、穂揃期における由来窒素含有量の多いLP20が、オオムギの省力施肥体系に適すると判断された。このことから、LP20と速効性肥料、さらに硬質コムギにおいて、生産年次に関係なく茎数を確保できたIBの配合肥料を開発し、分施栽培と比較した。配合肥料を施用した省力施肥区は、分施区と比べて、成熟期が1日遅く、倒伏程度は同程度、子実タンパク質含有率が高まったが、精麦適性、外観品質、収量は同程度であった。このことから、開発した配合肥料を施用する体系は、追肥回数を2回から1回へ省力できる高品質安定栽培である（図7-2）。



高品質省力施肥法

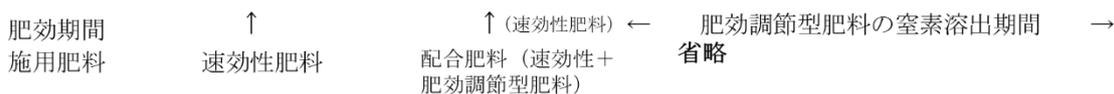


図7-2 慣行分施栽培と高品質省力施肥法の施用時期と回数，肥効期間（オオムギ）

子実タンパク質含有率が高まった要因が，出穂期以降のLP20の継続的な窒素溶出に起因するものであったことから，今後オオムギの高品質省力施肥法に適した窒素溶出タイプがLP20より短縮された肥効調節型肥料の開発が望まれる．また，硬質コムギ栽培の場合と同様に，収量，子実窒素含有量への地力の寄与が高いことが明らかとなったことから，高品質麦生産のためには，堆肥の施用や有機物の投入等による地力の向上を図る取り組みが課題となる．

近年，高品質麦類生産のため，コムギおよびオオムギの生育期間中にドローンあるいは人工衛星等で撮影した画像を植生指数（NDVI値等）へ変換し，ムギ類の生育量を数量化することによって，収穫時の耐倒伏性や子実タンパク質含有率および収量等を予測し，中間管理作業を診断するリモートセンシング技術の開発が進められている．本研究により，硬質コムギおよびオオムギにおける生育ステージごとの施肥窒素利用率および窒素寄与率が明らかとなり，また，地力の影響が大きいことが実証されたことから，生育期間中のムギ類の生育量を把握し，収穫期の生育量の予測を行うための適切なセンシング時期を把握することが可能になると考える．今後のリモートセンシング技術開発におけるセンシング時期を特定する際には，本研究で明らかにした硬質コムギおよびオオムギの窒素吸収動態に関する知見が重要な基礎資料と成り得るとともに，リモートセンシング技術開発の実用化が進むことによって，高品質省力施肥法の精緻化が進展することが期待されると考える．

以上，本研究によって，硬質コムギおよびオオムギの植物体中における地力および施肥に由来する窒素の吸収動態が明らかとなり，地力窒素と施肥窒素による収量，品質への貢献度が定量化される．その結果，効率的な窒素吸収を根拠とする高品質麦類生産を前提とした省力施肥体系を構築することが可能になったと考える．

謝 辞

本学位論文の作成にあたり，京都大学大学院農学研究科植物生産管理学分野教授，中崎鉄也博士より懇切丁寧な指導と校閲を賜った．衷心から感謝申し上げ，厚く御礼申し上げます．本論文の作成にあたって，九州大学，松江勇次博士より，終始懇篤なる指導と鞭撻を賜った．謹んで感謝の意を表す．論文のとりまとめにあたり，ご指導をいただいた京都大学大学院農学研究科農学専攻教授，白岩立彦博士，那須田周平博士に感謝申し上げます．本研究の着手から途上において有益な助言と激励を賜った元福岡県農業総合試験場豊前分場長，山本富三博士に衷心から感謝する．データ解析および一連の研究において有益な助言と協力を賜った福岡県農林業総合試験場筑後分場，荒木雅登博士に心から感謝する．本研究のとりまとめの際に，有益なご助言をいただいた元福岡県農林業総合試験場副場長，矢羽田第二郎博士，元福岡県農林業総合試験場豊前分場長，田中浩平博士に感謝の意を表す．さらに，研究の実施にあたっては福岡県農林業総合試験場豊前分場の先輩，同僚の各位に多大な援助と激励を賜った．ここに記して厚く御礼申し上げます．

本論文に関する公表済み文献

- 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率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.
- 石丸知道・荒木雅登・荒木卓哉 2021. 中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」において高い子実タンパク質含有率を確保し，穂肥と穂揃期追肥を省略できる省力施肥法. 日作紀 90:408-413.
- 石丸知道・荒木雅登 2022. 食糧用二条オオムギ「はるか二条」における施肥窒素利用率および地力窒素の寄与率. 日作紀 91:275-279.
- 石丸知道・荒木雅登 2023. 食糧用二条オオムギにおける穂肥が省略できる肥効調節型肥料を活用した省力施肥法. 日作紀 92:300-304.

引用文献

- Cassman, K.G., Bryant, D.C., Fulton, A.E. and Jackson, L.F. 1992. Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat. *Crop Sci.* 32:1251-1258.
- 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* 17:81-111.
- 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. *九沖農研セ報* 51:41-64.
- 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉雄・加藤哲郎編 1998. *土壌肥料用語辞典*. 農文協. 東京. 216-217.
- 福岡県農林水産部 2010. *福岡県麦栽培技術指針*, 福岡. 1-127.
- 古庄雅彦・馬場孝秀・宮崎真行・石丸知道・大野礼成・高田衣子・浜地勇次 2013. 日本初のラーメン用小麦品種「ちくしW2号」の開発と高品質生産技術の確立. *日作紀* 81 (別号1) :518-521.
- 古庄雅彦・塚崎守啓・松江勇次・内村要介・山口修・馬場孝秀・高田衣子・宮崎真行・浜地勇次 2009. ラーメン用小麦新品種「ちくしW2号」の育成. *福岡農総試研報* 28 :39-44.
- 岩渕哲也・松江勇次・松中仁 2011. パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」の子実タンパク質含有率の変動要因. *日作紀* 80 :403-407.
- 岩渕哲也・松江勇次・松中仁 2013. 出穂期前後の窒素追肥時期や尿素葉面散布がパン用コムギ品種「ミナミノカオリ」の生地物性に及ぼす影響. *日作紀*82 :135-140.
- 甲斐浩臣・塚崎守啓・高田衣子・古庄雅彦・馬場孝秀 2012. 皮性二条オオムギにおける退色粒の発生要因と評価法. *育種学研究* 14:50-56.
- 菅益次郎・片山正・武田元吉 1962. 裸麦の品質に関する研究 (第2報) 出穂後の尿素施用および遮光が品質に及ぼす影響. *四国農業研究* 8:53-56.
- 河田尚之・藤田雅也・八田浩一・松中仁・久保堅司・荒木均・田谷省三・小田俊介・塔野岡卓司・堤忠宏・関昌子・平将人・波多野哲也 2015. 極多収で穂発芽と主要な縞萎縮病ウイルス系統に抵抗性の二条大麦新品種「はるか二条」. *九州沖縄農研報告* 64:41-66.
- 木村秀也・志村もと子・山内稔 2001. 出穂後施用窒素がコムギの子実タンパク質に及ぼす影響. *土肥誌* 72:403-408.
- 気象庁 2022. 昭和26年(1951年)以降の梅雨入りと梅雨明け(確定値):九州北部(山口県を含む). https://www.data.jma.go.jp/cpd/baiu/kako_baiu04.html (2022年11月19日閲覧).
- 小林新・藤澤英司・羽生友治 1997. 被覆肥料の溶出と被覆膜内外の水分の挙動. *土肥誌* 68 :14-22.

- 久保田基成・桑原達雄・井ノ口明義 1991. 大麦の精麦特性と千粒重, 硝子率, タンパク質含量及びアミロース含量の関係. 北陸作報 26:89-92.
- 三好利臣・池田一徹・小野忠 1993. 水田裏作小麦の窒素吸収特性 (第1報) 有機物無施用下での窒素吸収. 佐賀農セ研報 28:57-80.
- 水上ゆかり・小林恭一 1993. 大麦の精麦加工適性と原麦の性状 (硝子質割合, 粒厚) との関係. 北陸作報 28:66-68.
- 水田圭祐・荒木秀樹・中村和弘・松中仁・高橋肇 2021. 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. 日作紀 90:18-28.
- 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.
- Nakano, H., Morita S. and Kusuda O. 2008. Effect of nitrogen application rate and timing on grain yield and protein content of the bread wheat cultivar 'Minaminokaori' in southwestern Japan. Plant Prod. Sci. 11:151-157.
- 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. 山口農技センター研報 1:56-70.
- 中辻敏朗 2003. 出穂期の窒素追肥による小麦子実タンパク質含有率上昇効果の土壤間差. 農及園78:751-755.
- 新良力也・西宗昭 1998. 北海道における秋播コムギ子実への施肥窒素の集積と土壤由来窒素の吸収. 土肥誌 69:604-611.
- 農林水産省 2006. 国内産小麦の品質評価基準に関する現状と課題.
https://www.maff.go.jp/j/press/cont2/pdf/20060313press_2e.pdf (2023年10月9日閲覧).
- 農林水産省 2008. 2005年農林業センサス報告書 第2巻 農林業経営体調査報告書-総括編-. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001013499&cycle=0&tclass1=000001013521&tclass2val=0> (2021年11月12日閲覧).
- 農林水産省 2021. 2020年農林業センサス報告書 第2巻 農林業経営体調査報告書-総括編-. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=7&year=2020&month=0&tclass1=000001147146&tclass2=000001155386&tclass3=000001155387> (2021年11月12日閲覧).
- 農林水産省 2022. 麦の参考統計表.
<https://www.maff.go.jp/j/press/nousan/boeki/attach/pdf/220318-3.pdf> (2023年10月9日閲覧).
- 興津信二・本多藤雄 1982. 溶脱問題を中心とした露地野菜の施肥の合理化に関する研究 II 結球性葉菜に対する緩効性肥料並びに窒素液肥の施用上の問題について. 野菜試

報 C6:51-72.

佐藤暁子 1991. 小麦のタンパク質含量安定化技術の開発. 農及園 66 :567-574.

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.

佐藤三佳子・五十嵐俊成・櫻井道彦・鈴木和織・柳原哲司・奥村正敏 2009. 北海道北部地域における春まきコムギ「春よ恋」に対する開花期以降の尿素葉面散布が子実タンパク質含有率と収量に及ぼす効果およびその変動要因. 日作紀 78 :9-16.

島崎由美・渡邊好昭 2010. コムギの子実タンパク質含有率—栽培による制御の可能性—. 日作紀 79 :407-413.

島崎由美・近藤始彦・渡邊好昭・松山宏美・平沢正 2013. 開花期の前と後に追肥した¹⁵Nのコムギ体内での分布. 日作紀82(別1) :278-279.

島崎由美・渡邊好昭・松山宏美・平沢正 2014. 窒素追肥の時期がコムギ品種「ユメシホウ」の収量および子実タンパク質含有率に及ぼす影響. 日作紀 83 :25-31.

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.

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.

武田元吉 2001. 転作全書 第1巻 ムギ. 農文協, 東京. 87-102.

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.

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.

田中浩平 2013. 現場が求める技術開発—硬質小麦「ちくしW2号」(ラー麦)普及の取り組みから—. 日作九支報 79 :65-68.

田中浩平 2014. 福岡県における小麦の湿害対策, 小麦タンパク質向上および雑草防除技術. 農及園89 :1030-1036.

谷口義則・藤田雅也・佐々木昭博・氏原和人・大西昌子 1999. 九州地域におけるコムギの粗タンパク質含有率に及ぼす穂孕み期追肥の効果. 日作紀 68 :48-53.

谷内賢三・田谷省三 1987. 黒ボク土壌がビール麦の粗蛋白含量に及ぼす影響. 日作関東支報 2:49-50.

田谷省三・塔野岡卓司・関昌子・平将人・堤忠宏・野中舜二・氏原和人・佐々木昭博・山口勲夫・新本英二・吉川亮・藤田雅也・谷口義則・坂智広 2003. 小麦新品種「ニシノカオリ」の育成. 九沖農研セ報 42:19-30.

塔野岡卓司・河田尚之・吉岡藤治・乙部千雅子 2010. 黒ボク土がオオムギの精麦品質に及ぼす影響—灰色低地土水田と黒ボク土畑におけるオオムギ精麦品質の差異—. 日作紀 79:296-307.

土屋一成・原嘉隆・中野恵子・草佳那子 2007. 早播に適したコムギ「イワイノダイチ」

- に対する肥効調節型肥料の施用効果. 日作紀九支報 73 :16-20.
- 上野秀人・田谷省三 1998. 小麦作における追肥窒素の重窒素トレーサー法による動態解析. 日作四国支報 35:8-9.
- 上野正夫・熊谷勝巳・富樫正博・田中信幸 1991. 土壌窒素と緩効性肥料を利用した全量基肥施肥技術. 土肥誌 62 :647-653.
- 浦野光一郎・長嶺敬 2001. 出穂後窒素追肥によるパン用小麦の製パン適性の向上. 日作中支集録 42 :30-31.
- 和田源七・庄司貞雄・高橋重郎 1973. 水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について. 日作紀 42 :84-90.
- 山下幸恵・西岡廣泰・横尾浩明 2005. パン用コムギ品種「ニシノカオリ」の子実タンパク質含有率に及ぼす穂揃期追肥の効果. 日作九支報 71 :20-22.

論文要旨

食糧自給率向上のため、麦類は作付面積拡大による増産が求められている。現在、ムギ類生産者が減少し、1戸当たりの作付面積が大幅に拡大しており、作業時間の増加や、コムギにおける高品質麦生産のための追肥回数の増加等により、ムギ類の生育に的確に対応した追肥作業の省力化が、生産現場から求められている。一方で、用途別の品質評価基準に対応した高品質麦類の安定生産が実需者に求められている。

こうした背景のなかで、中華めん用コムギ品種「ちくしW2号」および食糧用オオムギ品種「はるか二条」を用いて、地力および施肥に由来する窒素吸収動態の解明に基づいた、追肥回数を大幅に省略でき、加工用途に応じた高品質麦類生産を前提とした省力施肥体系を検討した。

1. 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率における施肥窒素の利用率と地力窒素の寄与率

硬質コムギにおける高品質麦類生産を前提とした省力施肥体系を構築するためには、効率的な窒素供給が重要と考え、¹⁵N標識硫酸を用いて、分施体系における地力および施肥に由来する窒素の寄与率と利用率を明らかにした。子実における窒素寄与率は、施用窒素が51~59%であったのに対し、地力が41~49%と高かった。各施肥の窒素利用率は、基肥が15~20%と最も低く、分けつ肥が37~56%、穂肥および穂揃期追肥が67~74%と高かった。また、登熟初期のコムギ植物体中の窒素含有量が多い年次では、少ない年次と比べて子実タンパク質含有率が高く、多収であった。これらのことから、窒素供給における地力の重要性および施肥窒素利用率の低い基肥削減の必要性が明らかとなった。また、高品質麦類生産には、登熟初期のコムギ植物体中の窒素含有量を高めることが効率的であった。

2. 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

省力施肥体系では、肥効調節型肥料を用いることから、子実タンパク質含有率が向上する穂揃期追肥の施用時期を把握する必要がある。しかし、穂揃期追肥の施用時期が子実タンパク質含有率に与える影響に関しては不明であった。そこで、分施体系において、穂揃期から穂揃期後28日の期間、7日おきに¹⁵N標識硫酸を施用し、施用時期による影響を調査した。その結果、ラーメンに適する子実タンパク質含有率12%以上を安定的に確保できたのは、穂揃期および穂揃期後7日であった。追肥時期と施肥窒素利用率および施肥窒素寄与率との間には有意な負の関係が認められ、遅い穂揃期追肥では施肥窒素利用率および施肥窒素寄与率が低下した。このことから、省力施肥体系を構築する際には、穂揃期~穂揃期7日に窒素が溶出する肥効調節型肥料を選定する必要がある。

3. 中華めん用コムギ「ちくしW2号」において高い子実タンパク質含有率を確保し、穂肥と穂揃期追肥を省略できる省力施肥法

分けつ肥施用時に速効性肥料と肥効調節型肥料の配合肥料を施用し、慣行の分けつ肥+穂肥+穂揃期追肥の追肥3回施用を、分けつ期の1回施用とする省力施肥体系を考案した。肥効調節型肥料は性質上、窒素溶出が始まると一定期間持続的に溶出し、ムギの生育期間中、窒素溶出が継続する。そこで、慣行の追肥時期である莖立期と穂揃期のほぼ中間の時

期にあたる止葉抽出期に、¹⁵N標識硫安窒素を施用し、施肥窒素利用率を調査した。その結果、施肥窒素利用率は65%程度で、茎立期および穂揃期の窒素施用と同程度であり、茎立期～穂揃期の施肥窒素利用率は70%程度と考えられた。肥効調節型肥料として、被覆尿素シグモイド型20日（S20）を選定し、S20の窒素溶出量の推移を調査した。S20の窒素溶出量は、止葉抽出期頃から増加し、穂揃期以降さらに増加した。茎立期～穂揃期の施肥窒素利用率が70%程度であることから、止葉抽出期以降に窒素の溶出量が増加し、穂揃期以降も窒素溶出が継続するS20は、生育期および穂揃期における窒素供給効果が高いと判断された。配合肥料を開発するうえで、シグモイド型肥料の窒素溶出は地温に依存するため、低温年では窒素溶出遅延が懸念され、S20および速効性肥料に加水分解型のイソブチルアルデヒド縮合尿素（IB）を加えた配合肥料を開発し、慣行の分施肥体系と比較した結果、同等の生育、収量で子実タンパク質含有率12%以上を確保できた。これにより、本体系は追肥回数を3回から1回へ省略できる高品質麦類生産技術であることが実証された。

4. 食糧用二条オオムギ「はるか二条」における施肥窒素利用率および地力窒素の寄与率

オオムギに適する高品質麦類生産を前提とした省力施肥法を構築するには、オオムギの窒素吸収動態を把握することが重要と考え、¹⁵N標識硫安を用いて、分施肥体系における地力および施肥に由来する窒素の寄与率と利用率を明らかにした。子実における窒素寄与率は、地力が40～45%、施肥窒素が55～60%で、硬質コムギと同様に地力の寄与率が高かった。各施肥の窒素利用率は、基肥が30～36%と低く、分けつ肥と穂肥は65～81%と高かった。このことから、地力の重要性が明らかとなり、施肥窒素利用率の低い基肥量の削減が必要であった。成熟期における子実窒素含有量に占める施肥由来の窒素含有比は、50%程度であった。オオムギの追肥体系は、出穂期より前に施用し、収量確保に力点を置いており、施肥由来の窒素含有比をさらに高めることが、多収につながると考えられた。

5. 食糧用二条オオムギにおける肥効調節型肥料を活用した穂肥が省略できる省力施肥法

肥効調節型肥料と速効性肥料の配合肥料を分けつ肥時に施用し、慣行の分けつ肥+穂肥の2回施用を、分けつ期のみ1回施用とする体系を考案した。オオムギは、子実タンパク質含有率が高まると精麦適性が劣ることから、高品質麦生産には、子実タンパク質含有率を高めずに、外観品質、収量を向上させることが重要である。そのため、肥効調節型肥料の窒素溶出量は、出穂期より前に多く溶出し、出穂期以降の溶出が少ないことが望ましい。このため、肥効調節型肥料の溶出パターンは、施用後に窒素の溶出が速やかに始まるリニア型とした。溶出タイプは、¹⁵N標識リニア型タイプを用いて、被覆尿素リニア型20日（LP20）と被覆尿素リニア型30日（LP30）を比較した。LP30と比べて、穂揃期におけるLP20に由来する窒素含有量が多く、窒素利用率も高いことから、LP20が省力施肥体系に適すると判断された。LP20と速効性肥料およびIBの配合肥料を開発し、分施肥体系と比較した結果、成熟期が1日遅かったが、倒伏程度、精麦適性、外観品質、収量は同程度であり、本体系は、追肥2回を1回に省力できる高品質麦類生産の可能な省力施肥体系であることが実証された。

6. これらをまとめると、硬質コムギおよびオオムギ生産における高品質麦類生産のために、次のようなことが明らかとなった。すなわち、地力の窒素寄与率が高いことから、堆肥等の有機物施用による地力の向上が重要である。昨今の肥料高騰を考慮し、施肥窒素利用率の低い基肥の施用量を削減する。耐倒伏性に配慮する必要があるが、施肥窒素利用率の高い施肥の窒素施用量を増肥することで、多収ムギ類生産が可能となる。硬質コムギにおいては、品質として最も重要な子実タンパク質含有率を高めるために、穂揃期追肥を穂揃期～穂揃期後7日に施用する。

以上のことから、硬質コムギおよび食糧用オオムギの植物体中における地力および施肥に由来する窒素の吸収動態が明らかとなり、効率的な窒素吸収を根拠とする高品質麦生産を前提とした省力施肥体系を構築することが可能になったと考える。