

開花期窒素追肥がパン用コムギの
子実タンパク質含有率と小麦粉品質に及ぼす影響
Effects of nitrogen topdressing at anthesis on grain protein concentration
and flour characteristics of bread wheat.

2014. 3

東京農工大学大学院

連合農学研究科

生物生産科学専攻

島崎 由美

目 次

要旨-----	4
第 I 章. 緒論-----	7
第 II 章. 開花後の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める要因の検討-----	12
材料と方法-----	12
1. 栽培法-----	12
2. 追肥方法-----	13
3. 収量, 収量構成要素および子実タンパク質含有率の測定-----	14
4. 乾物重, 窒素蓄積量の測定-----	14
5. ^{15}N を用いた解析-----	15
6. 統計処理-----	16
結果-----	16
1. 窒素追肥時期が収量, 収量構成要素, 子実タンパク質含有率に及ぼす影響-----	16
2. 窒素追肥時期が開花期と成熟期の乾物重に及ぼす影響-----	18
3. 窒素追肥時期が開花期と成熟期の窒素蓄積量に及ぼす影響-----	20
4. ^{15}N を用いた追肥窒素のコムギ体内での分布-----	22
考察-----	25
第 III 章. 異なる圃場条件に生育したコムギ, 基肥量と茎立期追肥量の異なるコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果-----	28

材料と方法	29
1. 栽培法	29
2. 乾物重, 収量, 収量構成要素および子実タンパク質含有率の測定	30
3. 窒素蓄積量の定量	30
4. 穂の乾物重と窒素蓄積量の解析	31
5. 統計処理	31
結果	32
1. 水田と畑で生育したコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果	32
2. 基肥量と茎立期追肥量の異なるコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果	35
考察	41

第 IV 章. 開花期窒素追肥が子実と小麦粉の品質に及ぼす影響

— 栽培圃場間差に着目して —	45
材料と方法	46
1. 供試品種と栽培方法	46
2. 製粉方法	46
3. 小麦粉の品質の測定	46
4. 製パン試験	47
5. 小麦粉中のタンパク質の分画定量	48
6. アラビノキシランの定量	48
7. 損傷デンプン割合の測定	49

結果	50
1. 開花期追肥がコムギの品質およびランク区分に及ぼす影響	50
2. 開花期追肥が小麦粉の品質および製パン性に及ぼす影響	50
3. 開花期追肥が小麦粉のタンパク質組成，損傷デンプン割合，アラビノキシラン量に及ぼす影響	53
考察	57
第 V 章．総合考察	62
1. 水田作コムギの子実タンパク質含有率を高めるための方策	62
2. 水田作コムギの小麦粉の製パン性に関わる要因	63
3. 水田作コムギの製パン性を向上させる方策	64
謝辞	66
引用文献	68

要旨

水田におけるパン用コムギ栽培においては、製パン性に関わる小麦粉の品質の向上が最も大きな課題である。製パン性に関わる小麦粉の品質には、子実タンパク質含有率が最も大きく影響し、子実タンパク質含有率を高くすることで小麦粉の品質が向上する。また、子実タンパク質含有率以外の要因も小麦粉の製パン性に関わることも知られている。コムギの子実タンパク質含有率を高くする栽培管理技術として、開花期前後の窒素追肥が現在普及し始めているが、この時期の追肥が子実タンパク質含有率を高める効果が大きい理由については分かっていない。また、水田で栽培されたコムギは畑で栽培されたコムギに比べて、子実タンパク質含有率が等しくても、小麦粉の製パン性に関わる性質が異なるといわれているが、その実態は明らかでない。本研究はパン用として近年育成されたコムギ品種「ユメシホウ」を用いて、開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率と小麦粉品質に及ぼす影響を、栽培圃場条件や窒素肥料条件の違いに着目して解析した。

まず、茎立期から登熟後期までの様々な時期に窒素追肥を行い、異なる時期の窒素追肥がコムギの子実収量と子実タンパク質含有率に及ぼす影響、乾物生産量や窒素蓄積量に及ぼす影響を無追肥区と比較した。その結果、収量は節間伸長期の開花前 16 日以前の追肥と登熟中期の開花後 20 日前後の追肥により増加する傾向がみられた。開花期前後の追肥では、1 穂粒数が減少して収量は増加しなかった。子実タンパク質含有率は、開花期以降の追肥によってのみ増加した。開花期前の追肥で子実タンパク質含有率が高まらなかったのは、無追肥区に比べて穂の窒素蓄積量は増加したが、開花前に茎葉に蓄積され、開花後に穂に転流する乾物の量（開花前蓄積乾物量）と開花後同化乾物量が多くなることによって、穂の総乾物蓄積量も窒素蓄積量と同程度に増加したためだった。一方、開花期以降の追肥では、無追肥区に比べて開花後同化乾物量よりも開花後の同化窒素量が大きく増加したことで子実タンパク質含有率が高くなった。

次に、土壌窒素含量（以下地力窒素）の少ない水田と多い畑、そして基肥と茎立期の窒素施肥量を変えて生育させたコムギを用いて、開花期の窒素追肥が子実タンパク質含有率に及ぼす影響を比較した。その結果、開花期窒素追肥量が同じでも子実タンパク質含有率は、畑に生育したコムギが水田のコムギより高かった。さらに、開花期窒素追肥量あたりの子実タンパク質含有率の増加割合は水田に生育したコムギが畑のコムギより大きかった。水田と畑の間に認められたと同様な開花期追肥が子実タンパク質含有率に及ぼす影響の違いは、基肥の種類と量、茎立期追肥量の違いによって同じ圃場でも認められた。すなわち、緩効性窒素肥料を加えて基肥窒素量を多くしたコムギは、基肥が化学肥料のみで基肥窒素量の少ないコムギに比較して、開花期の地上部窒素蓄積量が多くなり、開花期窒素追肥量あたりの子実タンパク質含有率の増加割合は小さかった。茎立期追肥を施用したコムギはしなかったコムギに比較して、開花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かった。

水田と畑で生育したコムギの子実と小麦粉の品質を比較したところ、開花期窒素追肥は小麦粉タンパク質含有率を高め、生地の物性を強力粉化し、パン比容積を大きくする効果があることが両圃場において確認された。しかし、水田に生育したコムギは畑のコムギに比較して、粒の灰分が多く、容積重が軽くなってランク区分が低くなる傾向があった。さらに、小麦粉タンパク質含有率が同じでも、ファリノグラムの吸水率は水田が畑よりも高く、小麦粉タンパク質含有率が約13%と高いときには、畑に比べて水田はファリノグラムの生地形成時間が短く、バロリメーターバリュウは低かった。小麦粉タンパク質含有率が同じでも、グリアジンの大部分が存在する SDS 可溶性低分子量画分（EMP 画分）量に対する高分子量グルテニンサブユニットの大部分が存在する SDS 不溶性の高分子量画分（UPP 画分）量の割合は水田より畑が高く、これがファリノグラムの各値における水田と畑の差の一因となっていることが示唆された。以上の結果は、従来タンパク質含有率以外は栽培環境にほとんど影響されないとされていた小麦粉の品質が開花前に吸収、蓄積され

る窒素の量などに関わる栽培条件の影響を受ける可能性を示唆するものである。

本研究を通じて、地力窒素の少ない水田などの圃場でも、開花期に窒素追肥を行うことによって、地力窒素の多い畑圃場と同程度にコムギの子実タンパク質含有率を高めることができること、小麦粉の製パン性は品種間差だけでなく、生育する圃場条件によっても異なることが明らかとなった。地力窒素の少ない圃場で高い製パン性を備えたパン用コムギを栽培するためには、開花期の追肥とともに開花期前の窒素蓄積量を増加させる肥培管理や窒素吸収を抑制する湿害などを引き起こす土壌条件の改善が必要であると考えられた。

第 I 章. 緒論

日本のコムギの作付面積は 20 万 9 千 ha, 85 万 7 千トンの生産量があり, 全国の生産量の 68.3%を北海道が占め, 次いで福岡県, 佐賀県がそれぞれ 5.8%, 4.0%を占めている(農林水産統計 2013). 作付面積では全国の 5 割以上を北海道が占め, 次いで福岡県, 佐賀県が多く, それぞれ 1 万 5 千 ha, 1 万 ha である(農林水産統計 2013). 地目に着目すると, 北海道のコムギは作付面積の 7 割以上が畑で栽培されているのに対して, 都府県では 9 割以上が水田で栽培されている(農林水産統計 2013). 収量は, 全国平均では 10a 当たり 410kg で, 北海道は 492 kg と高く, 都府県では 302 kg で低く, 関東・東山地域では 346 kg である(農林水産統計 2013).

2010 年に策定された「食料・農業・農村基本計画」では, 2020 年度の供給熱量ベースの食料自給率を 50 %にすることが目標として掲げられ, コムギは 2008 年の 88 万トンから 2020 年には 180 万トンへと大幅な生産増を図るという目標が定められている. この中では, 製パン用や中華めん用の国産コムギは使用割合を現在の 1 割未満から 4 割へと引き上げるとしている(農林水産省 2012).

優れた製パン用の小麦粉には, 生地の粘弾性が強力であることが必要であり, 粘弾性はグルテンに由来する. グルテンは小麦粉中に含まれる 2 つのタンパク質, グルテニンとグリアジンが元になっており, 小麦粉に水を加えてこねることで形成される(池田 2010). 同一品種内では, グルテンの粘弾性の強さはグルテンの量と比例するため, 子実タンパク質含有率は製パン性に大きく影響することが知られている(佐藤ら 1999). そのため, 製パン用のコムギは日本めん用のコムギと比べ, 子実タンパク質含有率が高いことが品質として特に求められる.

育種や栽培の面から高品質の製パン用のコムギの生産に対する取り組みが始まっている. 製パン用コムギの品種として近年では, ゆめかおり, ユメシホウ, ゆめちから, 銀河のちからなどの新品種が開発された(長野県 2009, 乙部ら 2009, 田引ら 2011, 東北農

業研究センター 2011). これらの製パン用コムギ品種は、子実タンパク質含有率が高い特性があるが、栽培面からは、品種や栽培地に合わせて安定して子実タンパク質含有率の高いコムギを生産できるような栽培体系の構築がいろいろと試みられている (建部ら 2006, 佐藤ら 2009).

コムギの子実タンパク質含有率は、子実重に対する子実中のタンパク質重量の割合で示されるために、子実中のタンパク質の絶対量だけでなく、子実重によっても増減する。子実のタンパク質含有率は、タンパク質収量 (収量×子実のタンパク質含有率) が等しいときには収量と反比例する。たとえば、収量がリン酸不足などの窒素以外の制限要因で増加しないときには、タンパク質含有率が増加し (江口ら 1969), リン酸と堆肥を施用することなどによって増収した場合には、子実タンパク質含有率が低下する (佐藤ら 1987). Triboi ら (2006)も、収量が増加するとタンパク質収量は増加するものの、子実タンパク質含有率は減少することを示した。このように、コムギの子実タンパク質含有率と収量の負の相関は数多く報告されている (江口ら 1969, Kibite and Evans 1984, Loffler ら 1985, 佐藤ら 1987, Selles and Zenter 2001, Triboi and Triboi-Blondel 2002, Fowler 2003, Asseng and Milroy 2006, Triboi ら 2006).

しかし、Kibite and Evans (1984) は 4 つの普通コムギ品種とこれらの品種から作られた 7 つの分離集団を用いて収量と子実タンパク質含有率を解析し、子実のデンプン蓄積とタンパク質蓄積の決定過程に同じ遺伝子が関与していないことを示した。Triboi and Triboi-Blondel (2002) も、子実炭素蓄積量は登熟期間が短くなると減少するのに対して、子実窒素蓄積量は登熟期間が短くなっても転流速度が大きくなるためほとんど変化しないことを示し、炭素と窒素の蓄積が比較的独立していることを示唆した。このような報告は、収量を低下させることなく子実タンパク質含有率を高くすることが可能であることを示している。しかし、子実タンパク質含有率は遺伝的変異に加えて環境条件に影響され、さらに遺伝的変異と環境条件の交互作用も加わる (Fowler 2003). 子実タンパク質含有率は同

一品種でも、生育環境や肥料の施用量を変えることによって 7 %から 20 %まで変化することもある (Shewry ら 2009)。このように、子実タンパク質含有率には植物の窒素蓄積に関わる遺伝的性質、環境条件に加えて、炭素蓄積に関わる遺伝的性質、環境条件が関わり、子実タンパク質含有率を制御するためには、非常に多くの要因を考慮する必要がある。

国内産の製パン用のコムギは、子実タンパク質含有率が低く、年次間や圃場間の変動が大きいことが問題とされてきた (佐藤ら 1991)。これらの問題の対処法として、開花期前後にあたる止葉展開期から登熟初期の窒素追肥がコムギの子実タンパク質含有率を高くする栽培管理技術として有効とされ、現在普及し始めている (谷口ら 1999, 佐藤 2000, 高山ら 2004, 建部ら 2006, 竹内ら 2006, 佐藤ら 2009, 佐藤ら 2011)。この時期の窒素追肥は、茎立期頃の生育前半の追肥と比べて収量を高める効果は小さいが、子実タンパク質含有率を増加させる効果が高いといわれている (佐藤 1991, 田谷 2001)。しかし、開花期前後の窒素追肥が、子実タンパク質含有率に及ぼす影響の過程については分かっていない。

また、開花期前後の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果は、コムギの生育条件などによって大きく異なることが、これまでの検討結果から推察される。高山ら (2004) は、開花期の窒素追肥は 1 g m^{-2} あたり子実タンパク質含有率を約 0.5 ポイント高めることを報告した。しかし、佐藤ら (2009) は開花後窒素を追肥しなくても子実タンパク質含有率が高いようなコムギでは、開花後窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果が低いこと、Nakano ら (2008) は分けつ盛期の追肥量が多いと開花期追肥による子実タンパク質含有率の増加率が低くなることを報告している。また、土壌の種類によっても出穂期の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める程度が異なることが報告されている (中辻 2003)。Triboi and Triboi-Blondel (2001) は開花期の植物体の窒素蓄積量が多いと開花期に窒素追肥を行っても子実タンパク質含有率が頭打ちになり高くないことを示した。このようにこれまでの検討から、開花期の植物体の窒素蓄積量が異なると、開花期前後の

窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果が大きく異なるようであるが、その過程はまだ整理されていない。

都府県のコムギ栽培面積の 9 割以上を占める水田でのコムギ栽培（農林水産省統計 2013）は、畑での栽培に比べて子実タンパク質含有率が低く（田野崎ら 1985, 渡邊 2010）、水田では畑とは違った窒素追肥法を開発する必要性が指摘されている（渡邊 2010）。田中ら（1983）は、畑に比べ水田のコムギの製パン性は劣ること、そしてその要因に子実タンパク質含有率が畑に比べ水田で低いことを挙げている。これらの報告から、適切な追肥によって水田のコムギの子実タンパク質含有率を高くできれば、水田のコムギの製パン性を大きく改善することができるものと予想される。

子実タンパク質含有率を高めると製パン性は向上するが（佐藤ら 1999）、一方では子実タンパク質含有率が同じでも、グリアジンに対するグルテニンの比が製パン性に影響することが報告されている（Uthayakumaran ら 1999, Uthayakumaran and Lukow 2005）。コムギの子実中に含まれるグルテニンとグリアジンにはそれぞれ種類があり、それぞれ製パン性が異なることが知られている。どの種類のグルテニン、グリアジンが含まれるかは、品種が持つグルテニンやグリアジンの遺伝子型によって決定する（Gupta and MacRitchie 1994, Takata ら 2000, 岩渕ら 2007, 谷中ら 2011）。栽培環境が子実タンパク質のグリアジンに対するグルテニンの比に及ぼす影響も検討されてきたが、多くはタンパク質含有率とグリアジンに対するグルテニンの比の関係に着目したもので（木村ら 2001, 岩渕ら 2007）、同一品種の等しいタンパク質含有率のコムギにおいて、栽培環境がグリアジンに対するグルテニンの比に及ぼす影響の検討を行った研究は見当たらない。栽培環境がコムギの品質に及ぼす影響を明らかにするためには、タンパク質含有率が同程度で、異なる栽培環境で生育したコムギを比較して検討する必要がある。

以上の日本のパン用コムギ栽培における課題とこれまでの製パン性に関わる内外の研究成果を踏まえ、本研究はパン用品種として近年育成されたコムギ品種ユメシホウを用い

て、水田で栽培したコムギの子実タンパク質含有率を高めるための端緒として、第 II 章では畑で窒素追肥の時期が子実タンパク質含有率に及ぼす影響を、開花後の乾物重と窒素蓄積量を解析することで検討した。第 III 章では、水田と畑、異なる施肥条件を用いて、開花期の地上部窒素蓄積量によって開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果が異なる要因を検討した。第 IV 章では、開花期追肥が小麦粉の品質や製パン性に及ぼす影響が生育条件によって異なる要因を、水田と畑で栽培したタンパク質含有率が同程度の小麦粉を用いて検討した。

第 II 章. 開花後の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める要因の検討

窒素追肥は、止葉展開期から登熟初期の開花期前後に行うと子実タンパク質含有率を高くすることが経験的に知られ、栽培管理技術として普及し始めている（谷口ら 1999, 高山ら 2004, 建部ら 2006, 竹内ら 2006, 佐藤ら 2009). しかし, この時期の追肥は茎立期頃の生育前半の追肥と比べて, 子実タンパク質含有率を増加させる効果が高いものの, 収量を高める効果は小さいといわれている（佐藤 1991, 田谷 2001). これら追肥時期の違いがコムギの生育にどのように影響し, どのような過程で子実タンパク質含有率や収量に違いを生じるかについては明らかになっていない.

そこで開花期前後の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める機構を解明するための端緒として, 本章では生育前半や開花期前後だけでなく, 茎立期から登熟後期までの様々な時期に窒素追肥を行い, 窒素追肥時期がパン用コムギの収量および子実タンパク質含有率に及ぼす影響を調査した. さらに, 窒素追肥の時期が開花後の乾物生産量や窒素蓄積量に及ぼす影響を調査し, 子実タンパク質含有率が窒素追肥時期によって異なる要因について検討を行った.

材料と方法

1. 栽培法

試験は, 製パン用品種ユメシホウを供試し, 2008 年播種, 2009 年収穫（以降 2008/2009 年と表記する. 他の作期も同様）と 2009/2010 年の 2 作期にわたって, 茨城県つくば市観音台の農業・食品産業技術総合研究機構（以降, 農研機構とする）内の淡色黒ボク土の畑試験圃場で行った.

試験には, 2008/2009 年は休閑の後, コムギ作付を開始して 2 年目の圃場を用い, 2009/2010 年は 2 年に 1 回コムギを作付し, 夏作としてピケットやソルガムを, コムギを

栽培しない年の冬作としてコマツナを栽培した圃場を用いた。コムギ以外のいずれの作目も、植物残渣は青刈りして土壤に鋤き込んだ。試験圃場の土壤は、2008/2009年は乾土1gあたり全窒素量が3.55mg、炭素量が42.8mg、2009/2010年は乾土1gあたり全窒素量が4.82mg、炭素量が60.8mgであった。

播種は、2008/2009年では11月20日に播種量 11 g m^{-2} 、条間18cmで、2009/2010年では11月6日に播種量 8 g m^{-2} 、条間18cmで行った。基肥は、2008/2009年では化成肥料(14-14-14)をN、 P_2O_5 、 K_2O の成分でそれぞれ、7、7、7 g m^{-2} 施肥し、2009/2010年では化成肥料(0-15-15)をそれぞれ、0、4、4 g m^{-2} 施用した。開花日は、2008/2009年では4月22日、2009/2010年では4月30日、成熟日は2008/2009年では6月2日、2009/2010年では6月15日であった。

2. 追肥方法

追肥は、2008/2009年では、茎立期にあたる開花前50日（開花前日数と開花後日数の区別を容易にするため、以下、開花前の日数はマイナスの符号を付けて表す。この場合は開花後-50日）の3月3日から、登熟後期にあたる開花後33日の5月25日まで約7日毎に計13時期に行った。開花後-50日は茎立期に、開花後-41日、-36日、-29日、-23日、-16日は節間伸長期に、開花後-9日は穂孕み期に、開花後-2日は穂揃い期に、開花後8日は登熟前期、開花後15日、21日、28日は登熟中期、開花後33日は登熟後期にあたる。2009/2010年では、茎立期にあたる開花後-49日の3月12日から、登熟後期にあたる開花後27日の5月27日まで約10日毎に計9時期に行った。開花後-49日は茎立期に、開花後-35日、-22日は節間伸長期に、開花後-17日は穂孕み期に、開花後-10日は出穂期に、開花後0日は開花期に、開花後10日は登熟前期に、開花後17日は登熟中期に、開花後27日は登熟後期にあたる。両年次ともこれら追肥区に対して追肥を行わない無追肥区を設けた。

追肥は、両年次とも窒素成分で 2 g m^{-2} となるよう 2.17 % 尿素水溶液を調整し、散布量を 200 mL m^{-2} として噴霧器で葉面散布した。試験区は、2008/2009 年では各区 10.8 m^2 の 3 反復完全無作為化法、2009/2010 年では各区 14 m^2 の 3 反復乱塊法で配置した。

3. 収量，収量構成要素および子実タンパク質含有率の測定

収量調査は、「小麦調査基準 第 1 版」(農業研究センター 1986) に準じて、整子実重，地上部風乾重，穂数，整粒歩合，千粒重を計測した。ただし，整子実重および整粒歩合の計測に用いた篩目の大きさは 2.2 mm とした。収量は整子実重で表し，千粒重とともに水分含量 12.5 % での値を示した。1 穂粒数は，収量を穂数と一粒重 (千粒重/1000) で除して求めた。子実タンパク質含有率は近赤外分析計 (インフラテック 1241 グレインアナライザー，FOSS) で測定し，水分含量 13.5 % での値を示した。収量調査には各区とも平均的な穂数を示した 1.08 m^2 を供した。

4. 乾物重，窒素蓄積量の測定

乾物重と窒素蓄積量の測定のための植物体の採取は，開花期と成熟期に行った。開花期については，2008/2009 年では 4 月 22 日に，2009/2010 年では 4 月 26 日に，試験区の中で生育の中庸な場所 0.09 m^2 からすべての株を根ごと抜き取り，根を切除後， $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で 2 日間通風乾燥し，地上部乾物重を測定して窒素分析に供した。

成熟期については，2008/2009 年では 6 月 2 日に 0.36 m^2 からすべての株を地際で刈り取り，これらの茎の中から中庸な穂を持つ茎 30 本を選び，穂と茎葉部に切り分け， $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で 2 日間通風乾燥し，地上部乾物重を測定して窒素分析に供した。刈り残った地際と地下の茎部については，生育が中庸な場所 0.09 m^2 の刈り株を根ごと採取し，根を切除後， $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で 2 日間通風乾燥し，乾物重を測定して窒素分析に供し，茎葉部の窒素量に加えた。2009/2010 年では 6 月 15 日に生育中庸な場所 0.09 m^2 の株を根ごと抜き取り，根を切除

後、茎葉および穂に切り分けて、80℃で2日間通風乾燥し、地上部乾物重を測定して窒素分析に供した。なお、2008/2009年では、13追肥区のうち1区おきに合計6追肥区を分析に供した。

窒素含有率は、乾物を微粉碎後、NCアナライザー（SUMIGRAPH NC-22F、(株)住化分析センター）で定量した。植物体の窒素蓄積量は、乾物重と窒素含有率の積で表した。

穂の乾物増加量と窒素の蓄積量は、Bancal (2009) の方法に基づき、開花後に新たに同化された乾物や窒素（以下、それぞれ開花後同化乾物、開花後同化窒素とする）がすべて穂へ蓄積したと仮定し、穂乾物重に占める開花後同化乾物量および開花前蓄積乾物量、および穂窒素蓄積量に占める開花後同化窒素量および開花前蓄積窒素量を、それぞれ次式により求めた。

$$(\text{開花後同化乾物量}) = (\text{成熟期の地上部乾物重}) - (\text{開花期の地上部乾物重})$$

$$(\text{開花前蓄積乾物量}) = (\text{成熟期の穂乾物重}) - (\text{開花後同化乾物量})$$

$$(\text{開花後同化窒素量}) = (\text{成熟期の地上部窒素蓄積量}) - (\text{開花期の地上部窒素蓄積量})$$

$$(\text{開花前蓄積窒素量}) = (\text{成熟期の穂窒素蓄積量}) - (\text{開花後同化窒素量})$$

5. ^{15}N を用いた解析

2009/2010年の試験のうち、止葉展開期の4月8日（開花後-22日）、開花期の4月30日（開花後0日）、登熟中期の5月17日（開花後17日）に試験区の一部の面積に ^{15}N を含む尿素水溶液を用いて追肥した。各時期に試験区内の出芽数が平均的な 0.09 m^2 、4ヶ所に窒素成分で 2 g m^{-2} となるよう、 ^{15}N 10.1 atom%を含む2.17%尿素水溶液を噴霧器で葉面散布した。追肥処理10日後および成熟期の6月15日（開花後46日）に各区それぞれ2ヶ所ずつ、すべての株を根ごと抜き取った。採取した株は根を切除後、葉身、稈+葉鞘、穂に分けて80℃で2日間通風乾燥し、窒素の分析に供した。窒素の測定は、安定同位体比測定用分析システム（Thermo Finnigan, Delta plus XP）を用いて行った。 ^{15}N の利用率

は、新良・西宗（1998）に準じて施用した尿素溶液中に含まれる全 ^{15}N 量 (g m^{-2}) に対する地上部植物体試料に含まれる ^{15}N 量 (g m^{-2}) の割合 (%) として求めた。

6. 統計処理

統計処理は統計ソフト (JMP 8.0.1, SAS Institute Inc.) を用いて行った。2008/2009 年の結果については、無追肥区を対照区とした両側 t 検定を、2009/2010 年の結果については、無追肥区を対照区とした対応のある両側 t 検定を用いて検討した。

結果

1. 窒素追肥時期が収量，収量構成要素，子実タンパク質含有率に及ぼす影響

第 II-1 表に、異なる時期に窒素追肥したコムギの収量，収量構成要素および子実タンパク質含有率を示した。

収量は、2008/2009 年では、いずれの追肥区においても無追肥区との間に有意差は認められなかったが、開花後 -41 日，-29 日，-23 日および 15 日追肥区で 570g m^{-2} 以上と多かった。2009/2010 年では、開花後 17 日追肥区が 5 %水準で、開花後 -17 日追肥区が 10 %水準で無追肥区よりも有意に多く、開花後 -22 日追肥区も無追肥区よりも多い傾向があった。

穂数は、2008/2009 年，2009/2010 年ともに、いずれの追肥区も無追肥区との間に有意差は認められなかったが、2008/2009 年は開花後 -36，-23 日追肥区が無追肥よりも多い傾向が認められた。整粒歩合は 2008/2009 年，2009/2010 年ともに追肥による有意な違いは認められなかった。1 穂粒数は 2008/2009 年では開花後 33 日追肥区が無追肥区よりも 5 %水準で有意に少なかった。さらに、開花後 -9 日追肥区で無追肥区よりも少ない傾向がみられた。2009/2010 年では、いずれの追肥区も無追肥区との間に有意差は認められなかったが、開花後 -10 日追肥区で無追肥区よりも少ない傾向がみられた。千粒重は

第II-1表 異なる時期に窒素追肥したコムギにおける収量、収量構成要素および子実タンパク質含有率.

年次	開花後追肥日(日)	収量		穂数		整粒歩合(%)		1穂粒数		千粒重(g)		子実タンパク質含有率(%)	
		(g m ⁻²)	p	(本 m ⁻²)	p	(%)	p	(g)	p	(%)	p		
2008/2009年													
	無	468		338		99.2		37.8		36.3		9.5	
	-50	532	0.535	385	0.391	99.4	0.574	37.5	0.880	36.7	0.416	9.7	0.458
	-41	586	0.450	419	0.358	98.9	0.545	37.6	0.951	36.6	0.554	9.9	0.218
	-36	544	0.368	400	0.192	99.0	0.617	37.5	0.911	36.3	0.958	9.4	0.745
	-29	581	0.506	438	0.336	98.6	0.192	36.0	0.513	35.9	0.374	10.0	0.355
	-23	570	0.223	401	0.181	98.7	0.130	39.4	0.377	36.2	0.855	9.6	0.519
	-16	496	0.799	363	0.647	99.3	0.947	36.6	0.599	37.0	0.163	9.6	0.587
	-9	461	0.958	375	0.575	99.1	0.535	32.2	0.137	37.3	0.179	9.9	0.311
	-2	463	0.951	347	0.849	99.6	0.224	34.4	0.316	38.6	0.005**	10.5	0.019*
	8	484	0.900	351	0.859	99.7	0.119	35.6	0.328	38.3	0.004**	11.1	0.007**
	15	584	0.256	407	0.210	99.4	0.688	37.9	0.974	37.7	0.023*	11.1	0.003**
	21	522	0.718	381	0.657	99.3	0.960	36.7	0.667	37.0	0.180	10.5	0.023*
	28	525	0.568	372	0.556	99.4	0.619	37.6	0.895	37.4	0.043*	10.9	0.003**
	33	355	0.197	291	0.293	99.6	0.172	33.2	0.046*	36.8	0.294	9.9	0.102
2009/2010年													
	無	716		532		99.0		34.2		39.5		12.0	
	-49	734	0.504	536	0.823	98.7	0.347	35.5	0.263	38.6	0.119	12.0	0.992
	-35	737	0.448	548	0.349	98.9	0.855	34.4	0.863	39.1	0.017*	12.2	0.364
	-22	763	0.135	541	0.782	99.0	0.904	35.7	0.408	39.5	0.973	12.3	0.284
	-17	765	0.099+	561	0.389	98.9	0.926	35.0	0.625	39.0	0.333	12.3	0.469
	-10	668	0.232	536	0.750	99.2	0.221	31.4	0.020	39.7	0.749	12.3	0.053+
	0	681	0.101	521	0.750	99.4	0.235	32.6	0.325	40.0	0.184	12.5	0.200
	10	708	0.483	511	0.439	99.3	0.543	35.0	0.444	39.6	0.912	13.1	0.025*
	17	752	0.043*	520	0.584	99.2	0.528	36.2	0.318	40.0	0.103	12.8	0.040*
	27	674	0.216	498	0.307	99.0	0.951	34.9	0.270	38.9	0.494	12.7	0.154

収量、千粒重は水分含量12.5%, 子実タンパク質含有率は水分含量13.5%での値.

p: 各追肥区と無追肥区の比較により得られたt値に対する外側両側確率.

+, *, **は、それぞれ10%, 5%, 1%水準で無追肥区との間に有意差があることを示す.

2008/2009年では開花後-2日, 8日追肥区が1%水準で, 開花後15日, 28日追肥区が5%水準で無追肥区より有意に重かった。そして開花後-16, -9, 21日追肥区で無追肥区より重い傾向が認められた。2009/2010年では, 開花後-35日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に軽く, 開花後0, 17日追肥区で無追肥区より重い傾向があった。

子実タンパク質含有率は, 2008/2009年では開花後8日, 15日, 28日追肥区が1%水準で, 開花後-2日, 21日追肥区が5%水準で無追肥区より有意に高く, 開花後33日追肥区で高い傾向があった。2009/2010年では開花後10日, 17日追肥区が5%水準で, 開花後-10日追肥区が10%水準で無追肥区より有意に高く, 開花後27日追肥区で高い傾向があった。

2. 窒素追肥時期が開花期と成熟期の乾物重に及ぼす影響

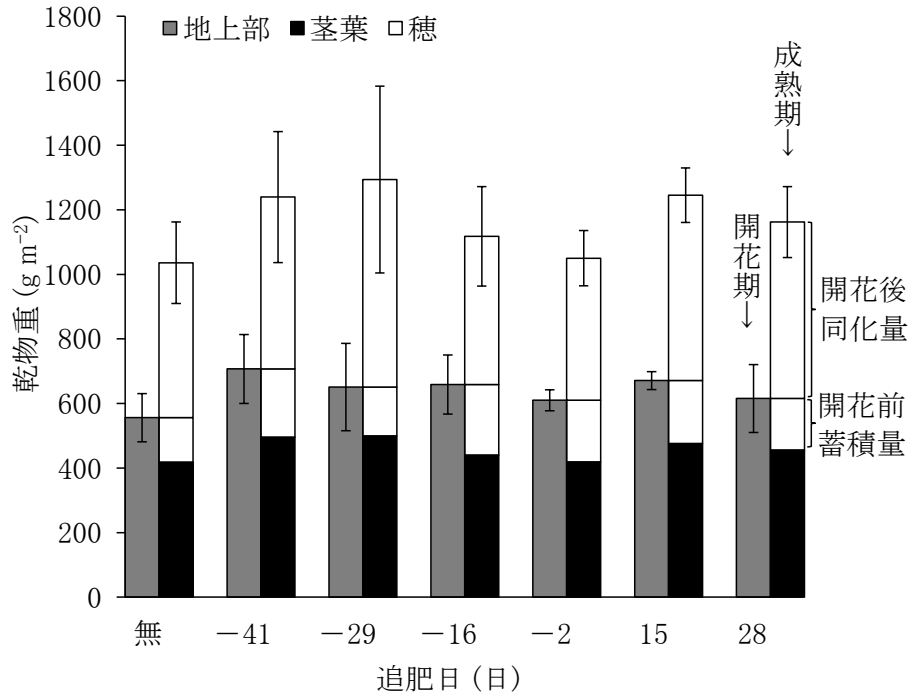
第II-1図に, 異なる時期に窒素追肥したコムギの開花期および成熟期における地上部乾物重と成熟期の穂乾物重に占める開花前蓄積乾物量と開花後同化乾物量を示した。

開花期の地上部乾物重は, 2008/2009年では, いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられなかった。2009/2010年においても, いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられなかった。成熟期の地上部乾物重は, 2008/2009年ではいずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられなかった。2009/2010年では開花後-17日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に重かった。

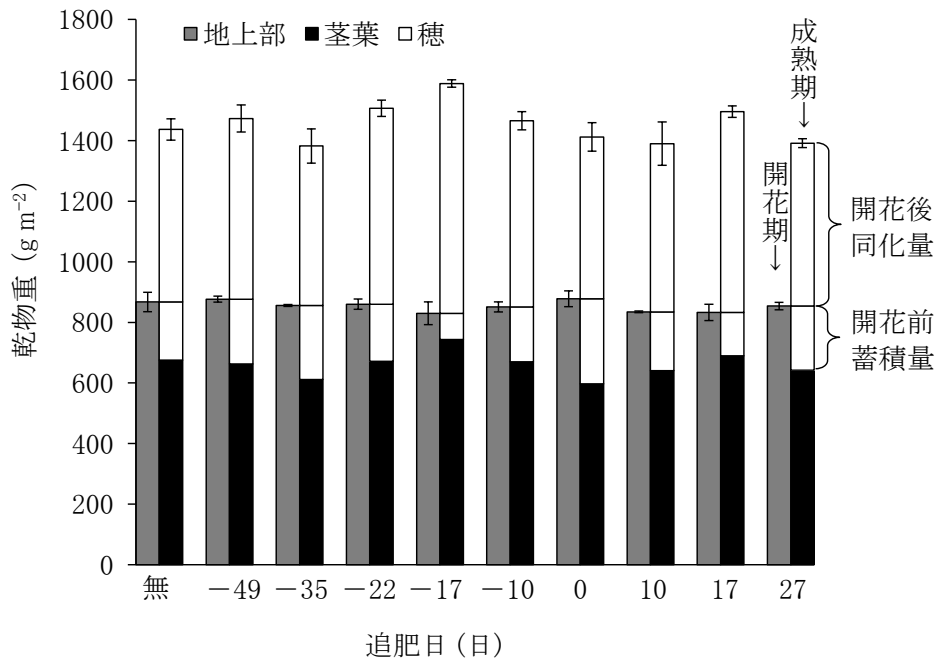
成熟期の茎葉部乾物重は2008/2009年では, いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられず, 2009/2010年では開花後-35日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に軽かった。穂乾物重は2008/2009年では, いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられず, 2009/2010年では開花後-17日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に重かった。

成熟期の穂乾物重に占める開花前蓄積乾物量は, 2008/2009年では, いずれの追肥区も無追肥区と有意差は認められなかったが, 開花後-41日, -16日追肥区で無追肥区より

A (2008/2009 年)



B (2009/2010 年)



第II-1図 2008/2009年(A)と2009/2010年(B)のコムギの開花期および成熟期における地上部器官別の乾物重。

無は無追肥区，追肥日のマイナスとプラスの値はそれぞれ開花前と開花後の日数を示す。各追肥日とも左側の棒は開花期，右側の棒は成熟期を示す。図中の棒線は開花期及び成熟期の地上部乾物重の標準誤差を示す。

も多い傾向が認められた。2009/2010年では、開花後-17日追肥区が無追肥区よりも5%水準で有意に少なかった。

成熟期の穂乾物重に占める開花後同化乾物量は、2008/2009年では、いずれの追肥区も無追肥区と有意差は認められなかったが、開花後-41日、-29日、15日、28日追肥区で無追肥区よりも多い傾向が認められた。2009/2010年では、開花後-17日追肥区が5%水準で、開花後-22日、17日追肥区が10%水準で無追肥区よりも有意に多かった。

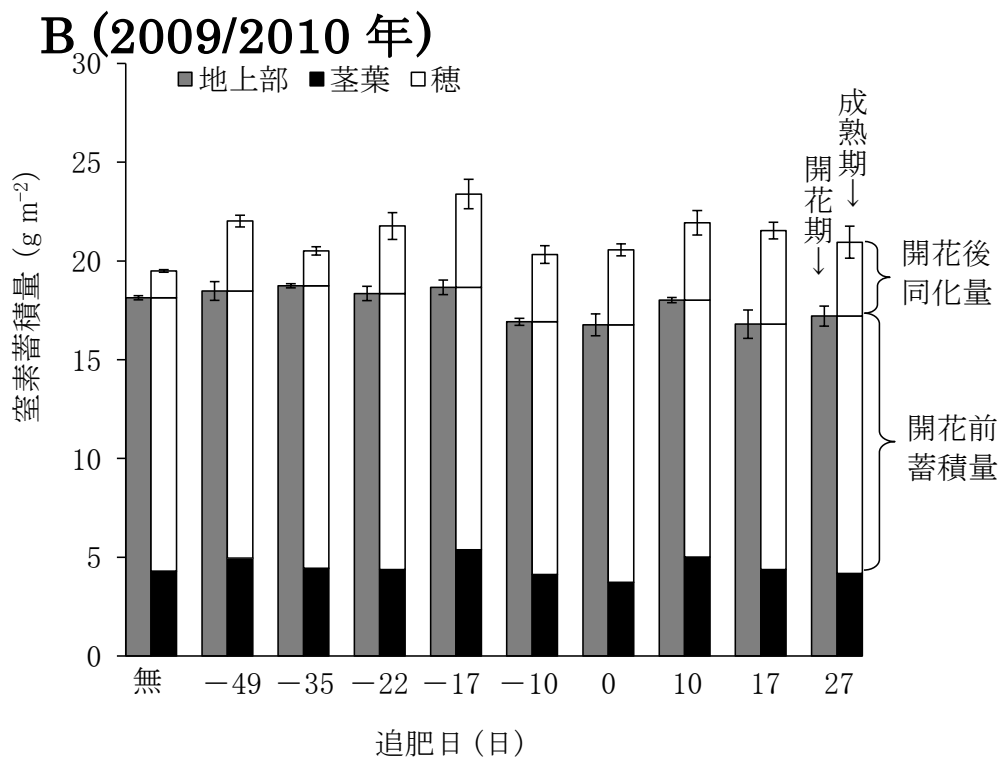
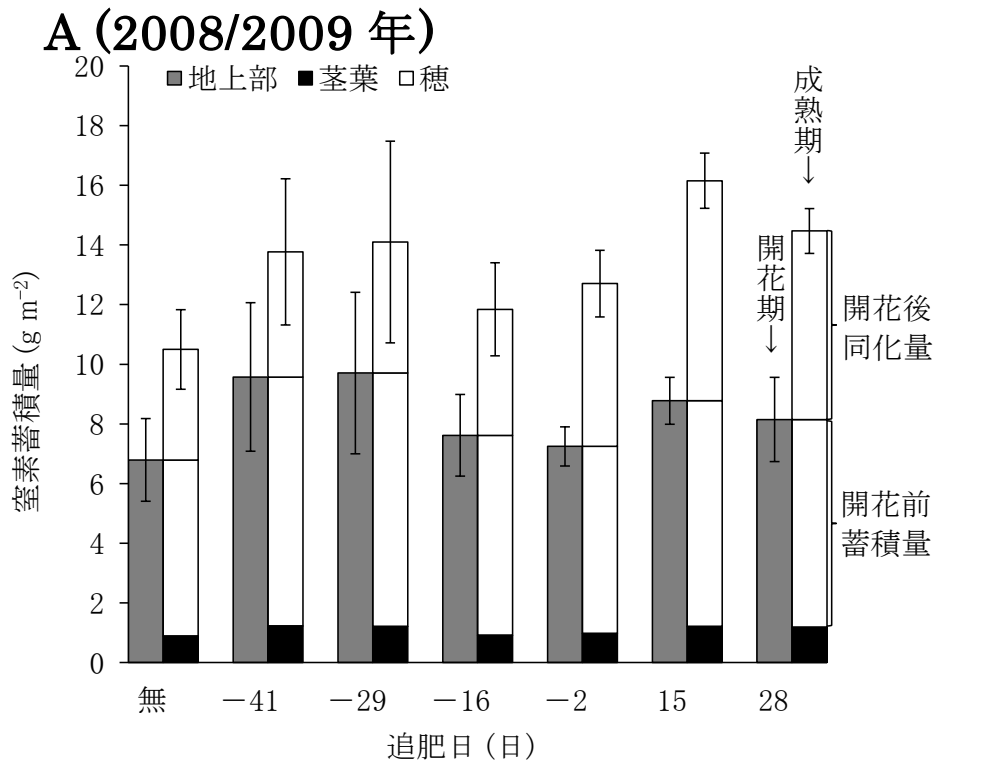
3. 窒素追肥時期が開花期と成熟期の窒素蓄積量に及ぼす影響

第II-2図に、異なる時期に窒素追肥したコムギの開花期および成熟期における地上部窒素蓄積量と成熟期の穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量と開花後同化窒素量を示した。

開花期の地上部窒素蓄積量は、2008/2009年では、いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられなかったが、開花後-41日、-29日追肥区で無追肥区よりも多い傾向があった。2009/2010年では、開花後-35日追肥区が無追肥区より10%水準で有意に多く、開花後-10日追肥区が無追肥区より1%水準で有意に少なかった。一方、成熟期の地上部窒素蓄積量は、2008/2009年では開花後15日追肥区で5%水準で、開花後28日追肥区で10%水準で有意に多かった。2009/2010年では開花後-49日追肥区が1%水準で、開花後-35日、-22日、-17日、10日追肥区が5%水準で、開花後0日追肥区が10%水準で無追肥区より有意に多かった。

成熟期の茎葉部窒素蓄積量は2008/2009年では、いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられず、2009/2010年においても、いずれの追肥区も無追肥区と有意差はみられなかった。穂窒素蓄積量は2008/2009年では、開花後15日、28日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に多かった。2009/2010年では開花後-17日、0日追肥区が無追肥区より5%水準で有意に多かった。

成熟期の穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量は、2008/2009年では、いずれの追肥



第II-2図 2008/2009年 (A) と2009/2010年 (B) のコムギの開花期および成熟期における地上部器官別の窒素蓄積量。

無は無追肥区，追肥日のマイナスとプラスの値はそれぞれ開花前と開花後の日数を示す。各追肥日とも左側の棒は開花期，右側の棒は成熟期を示す。図中の棒線は開花期及び成熟期の地上部窒素蓄積量の標準誤差を示す。

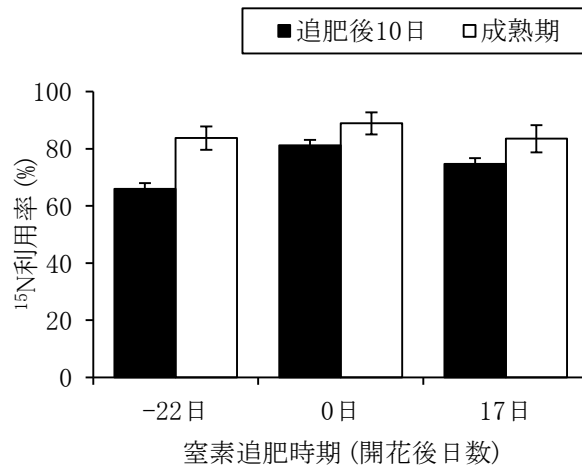
区も無追肥区と有意差は認められなかった。2009/2010年では、開花後17日追肥区が無追肥区よりも5%水準で有意に少なかった。

成熟期の穂窒素蓄積量に占める開花後同化窒素量は、2008/2009年では開花後-2日、28日追肥区が5%水準で、開花後15日追肥区が10%水準で無追肥区よりも有意に多かった。2009/2010年では、開花後-22日追肥区が1%水準で、開花後-49日、-17日、-10日、17日追肥区が5%水準で、開花後-35日、0日追肥区が10%水準で無追肥区よりも有意に多かった。

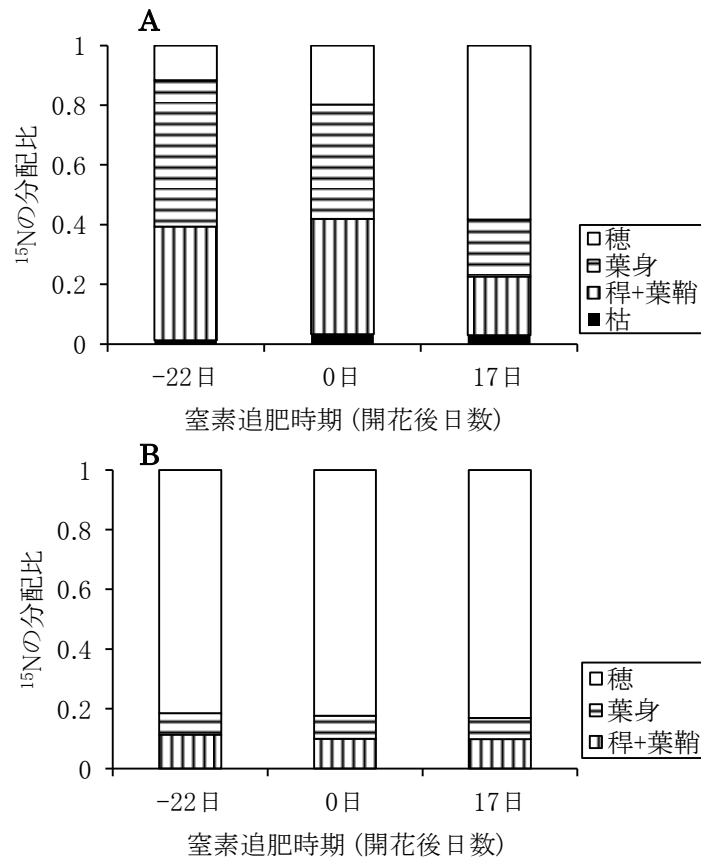
4. ^{15}N を用いた追肥窒素のコムギ体内での分布

施用した ^{15}N の追肥後10日における利用率は、66~81%、成熟期には84~89%で、どちらの時期の ^{15}N の利用率にも追肥時期による有意差は認められなかった(第II-3図)。

追肥後10日の各器官への ^{15}N 分配比(各器官の ^{15}N 量/地上部総 ^{15}N 量)は追肥時期によって大きく異なった。すなわち穂への ^{15}N の分配比は、開花後-22日の追肥では11.6%であったのに対し、追肥時期が遅くなるほどその割合は高くなり、開花後17日の追肥では58.3%であった(第II-4図A)。穂とは対照的に茎葉への ^{15}N の分配比は追肥時期が遅くなるほど小さくなり、葉身への分配比は開花後-22日の追肥では49.1%であったが、開花後0日では38.2%とやや減少し、開花後17日の追肥では19.1%と大きく減少した(第II-4図A)。稈+葉鞘への分配比は開花後-22日、0日の追肥では約38.5%であったのに対して、開花後17日の追肥では19.7%に減少した(第II-4図A)。成熟期では各器官への ^{15}N の分配は追肥時期による相違は認められず、 ^{15}N の約80%が穂に分配されていた(第II-4図B)。



第 II-3 図 窒素追肥時期と追肥後 10 日 (■) と成熟期 (□) における地上部の ^{15}N 利用率.
 図中の棒線は標準誤差を示す. 追肥後 10 日および成熟期のいずれにおいても, ^{15}N 利用率の窒素追肥時期による違いには 5 %水準で有意差がなかった.



第 II-4 図 窒素追肥時期が追肥後 10 日 (A) と成熟期 (B) における ^{15}N の地上部各器官への分配比に及ぼす影響.

考察

本章では、2008/2009年および2009/2010年の2作期において試験を行った。その結果、施用した追肥窒素量は等しかったのにも関わらず、2009/2010年は2008/2009年に比べて収量が高く、子実タンパク質含有率も高かった。一方、2作期を通じて追肥時期に対する収量や子実タンパク質含有率の応答には共通点が多くみられたので、以降共通点について詳しく見ていく。

収量は、開花-16日以前の節間伸長期や登熟中期の開花後20日前後の追肥により増加したものの、開花期前後の追肥では増加しなかった(第II-1表)。子実タンパク質含有率は節間伸長期の追肥では増加しなかったが、開花期前後ならびにそれ以降の追肥で増加した(第II-1表)。これらの結果は、開花期前後の窒素追肥は生育前半の追肥に比べて子実タンパク質含有率を高めるものの収量は高めないとするこれまでの報告(佐藤1991, 田谷2001)とも一致した。登熟中期の追肥では、子実タンパク質含有率が高まると同時に収量も高まる傾向が認められた。登熟が進んでからの窒素追肥が子実タンパク質含有率や収量に及ぼす影響についての検討は多くないが、登熟中期の追肥が子実タンパク質含有率を無追肥区に比べて有意に高めるだけでなく収量も多くなる可能性を示した報告もある(佐藤ら1999, 佐藤ら2009)。子実タンパク質含有率は収量とは負の相関関係にあることが知られている(江口ら1969, Triboiら2006)一方で、登熟期間が短くなった場合に子実炭素蓄積量が減少しても、子実窒素蓄積量はほとんど変化しないことなどから、炭素と窒素が独立して蓄積することも示されている(Triboi and Triboi-Blondel 2002)。本研究の結果は、登熟中期の追肥によって、子実タンパク質含有率の増加と同時に収量も増加する可能性を示唆するものである。

次に窒素追肥時期が地上部と穂の乾物蓄積と窒素蓄積に及ぼす影響を、節間伸長期、登熟中期、開花期前後に着目して考察する。節間伸長期の窒素追肥は、開花期における地上部乾物重を増加させることは認められなかったものの、成熟期の地上部乾物重を増加させ、

成熟期の穂乾物重に占める開花後同化乾物量を増加させて穂乾物重を増加させる傾向が認められた(第 II-1 図)。開花前に追肥された窒素は、まず、茎葉部に多く回され(第 II-4 図)、分けつの枯死を防いだり、新たな分けつの発生を促進したりして(佐藤ら 1992, 倉井ら 1998)、葉面積の拡大、維持に寄与する(義平ら 2006)。葉身に蓄積した窒素は Rubisco をはじめとする光合成関連酵素を増加させ、葉の光合成活性を高める(Makino ら 1988)。本章でも、節間伸長期の窒素追肥によって、開花期までの乾物生産量の増加は有意ではなかったが、穂数が増加し、開花期の地上部窒素蓄積量が増加する傾向が認められたことから(第 II-2 図)、開花期までに葉面積や葉の光合成関連酵素を増加させ、個体群の光合成を高める体制ができていたと考えられる。その結果として、開花後同化乾物量が増加した(第 II-1 図)ものと考えられる。一方、穂の窒素蓄積量に占める開花後同化窒素量も節間伸長期の追肥によって増加したが(第 II-2 図)、子実タンパク質含有率が高まらなかった(第 II-1 表)のは、江口ら(1969)の報告のように、開花後同化した窒素量の増加と併せて穂の乾物量の増加も大きかったためと考えられる。

登熟中期の窒素追肥は、成熟期の地上部乾物重には影響しなかったが、成熟期の穂乾物重に占める開花後同化乾物量を増加させた(第 II-1 図)。開花後の窒素追肥が収量や乾物生産に及ぼす影響については、影響がなかったという報告(Rawluk ら 2000, Nakano ら 2008)や、増加させたという報告(Altman ら 1983, 岩淵・田中 2005, 佐藤ら 2009)がある。Oscarson(1996)は同化された窒素は直ちに穂に転流する可能性を示しており、そのような場合は、追肥窒素が乾物生産に及ぼす影響は小さいと考えられる。実際、追肥時期が遅くなるのに伴い、追肥窒素が葉や稈、葉鞘へ分配される割合は減少し、とくに開花後 17 日の追肥では、追肥された窒素の約 6 割が追肥後 10 日には穂に分配されていた(第 II-4 図 A)。しかしながら、登熟中期の追肥によって開花後同化乾物量が増加したことは(第 II-1 図)、追肥した窒素は登熟中期でも葉の窒素含量を高めて老化を抑制して個体群の光合成活性を高く維持したことを示唆している。さらに、登熟中期の窒素追肥は開花後同

化窒素量を大きく増加させた（第 II-2 図）．追肥窒素は基肥窒素に比べて利用率が高く（新良・西宗 1998），とくに，開花後に吸収された窒素の約 92 %が最終的に子実へに転流する（Bancal 2009）と報告されている．本章の結果でも，葉面散布による追肥窒素の吸収・同化率には追肥時期による相違がなかった（第 II-3 図）．これらの報告は，開花後の追肥窒素は開花前に追肥した窒素に比較して子実のタンパク質の蓄積に効率よく利用されることを示唆している．登熟中期の窒素追肥が，収量だけでなく子実タンパク質含有率をも無追肥区に比べて高めたことは，この時期の追肥が登熟期の乾物生産を高めるとともに，それ以上に子実への窒素の流入が大きかったことを示している．

一方，開花期前後の窒素追肥によって成熟期の地上部乾物重，開花後同化乾物量は増加しなかった（第 II-1 図）．この結果は，上述のようにこれまでの多くの報告（佐藤ら 1999，Rawluk ら 2000，Nakano ら 2008）と一致するものである．開花期前後の窒素追肥では，1 穂粒数が無追肥区よりも少ない傾向があったことから（第 II-1 表），開花期前後の葉面散布が受精あるいは初期の子実の生長に影響してシンク容量を減少させたこと，そしてシンク容量の減少に伴って葉への可溶性炭水化物の蓄積が引き起こす光合成のフィードバック阻害（Plaut ら 1987，Labraña and Araus 1991）が生じたことなどが，収量や乾物生産が増加しなかった要因として考えられる．開花後同化窒素量は開花期前後の窒素追肥によって大きく増加し（第 II-2 図），子実タンパク質含有率を高めた（第 II-1 表）．開花期前後および登熟中期の窒素追肥が乾物生産と収量に及ぼす影響の実態とその過程については今後詳しく検討すべき課題である．

第 III 章. 異なる圃場条件に生育したコムギ, 基肥量と茎立期追肥量の異なるコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果

開花期の窒素追肥は開花前の追肥に比較して, 開花後同化窒素量に対する開花後同化乾物量が小さかったため子実タンパク質含有率が高くなることを前章で明らかにした. しかし, 子実タンパク質含有率は, 開花後の同じ時期に同じ量の窒素を追肥しても, 作付前歴が異なり土壌窒素濃度の異なる圃場に生育したコムギでは, 大きく異なった.

開花期の窒素追肥は, 追肥窒素 1 g m^{-2} あたり子実タンパク質含有率を約 0.5 ポイント高めることが報告されている (高山ら 2004). しかし, 開花後窒素追肥をしなくても子実タンパク質含有率の高いコムギでは, 開花後窒素追肥の子実タンパク質含有率を高める効果は低いこと (佐藤ら 2009), 分けつ盛期の追肥量が多いと子実タンパク質含有率の増加率が低いこと (Nakano ら 2008), 土壌の種類によって出穂期の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める程度が異なること (中辻 2003) なども報告されている. 土壌の種類によって出穂期の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める程度が異なることについて, 中辻 (2003) は, 土壌の窒素肥沃度等の違いに起因する追肥時のコムギ地上部窒素含有量の差異が原因であると推察している. 前章でも, 窒素濃度の高い土壌に生育したコムギ (2009/2010 年) は低い土壌に生育したコムギ (2008/2009 年) に比較して開花期までの地上部窒素蓄積量が多く, 子実タンパク質含有率が高く, そして開花期以降の追肥窒素 1 g m^{-2} あたりの子実タンパク質含有率を高める効果が低かった.

そこで本章では, 開花期までの地上部窒素蓄積量が開花期窒素追肥の子実タンパク質含有率を高める効果に及ぼす影響とその要因を検討する目的で, 土壌窒素含量の異なる圃場や基肥と茎立期の窒素施肥量を変えて生育させたコムギを用いて, まず開花期の窒素追肥が子実タンパク質含有率に及ぼす影響を比較した. さらに開花期までの地上部窒素蓄積量が子実タンパク質含有率と開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率増加程度に影響する過

程を、前章と同様に成熟期の穂の乾物重を開花後に新たに同化された乾物量（開花後同化乾物量）と開花期までに同化された乾物量（開花前蓄積乾物量）に、成熟期の穂の窒素蓄積量を開花後に新たに同化された窒素量（開花後同化窒素量）と開花期までに同化された窒素量（開花前蓄積窒素量）に分けて検討した。

材料と方法

1. 栽培法

試験は 2008/2009 年，2010/2011 年の 2 作期にわたって，茨城県つくば市観音台の農研機構内の圃場で製パン用コムギ品種ユメシホウを用いて行った。

2008/2009 年は，水田（灰色低地土，乾土 1 g あたりの全窒素 2.57 mg，全炭素 26.30 mg）および畑（淡色黒ボク土，乾土 1 g あたりの全窒素 4.82 mg，全炭素 60.82 mg）圃場を用いて試験を行った。播種は 2008 年 11 月 11 日に播種量 8 g m^{-2} ，条間 18 cm で行った。施肥は第 III-1 表に示した通り，それぞれの圃場で合計 16 処理区を設けた。すなわち基肥は化成肥料（14-14-14）を N， P_2O_5 ， K_2O の成分で水田にはそれぞれ 4，4，4 あるいは 8，8，8 g m^{-2} ，畑にはそれぞれ 2，2，2 あるいは 4，4，4 g m^{-2} 施用した。追肥は両圃場とも茎立期と開花期に行った。茎立期追肥は 2009 年 3 月 3 日に硫安を窒素成分 0 あるいは 2 g m^{-2} 施用した。開花期追肥は 4 月 24 日に硫安を窒素成分 0，2，4，8 g m^{-2} 施用した。試験区は，各圃場内に基肥と茎立期追肥の合計 4 処理区を乱塊法で 3 反復配置し（合計 12 区），その中に開花期追肥区 4 水準を 1 反復で配置した（合計 48 区）。各試験区の面積は水田では 6.9 m^2 ，畑では 10.4 m^2 であった。なお，開花日は水田では 2009 年 4 月 20 日，畑では 4 月 22 日，成熟日は水田で 2009 年 5 月 29 日，畑で 6 月 4 日であった。

2010/2011 年は，2008/2009 年とは異なる畑（淡色黒ボク土，乾土 1 g あたりの全窒素 3.67 mg，全炭素 43.52 mg）圃場を用いて試験を行った。播種は 2010 年 11 月 19 日に播種量 8 g m^{-2} ，条間 30 cm で行った。施肥は第 III-4 表に示した通り，合計 18 処理区を設

けた．すなわち基肥として化成肥料（14-14-14）のみを N, P₂O₅, K₂O の成分でそれぞれ 7, 7, 7 g m⁻² 施用した区（以降化成区とする），化成区と同量の化成肥料に加えて緩効性肥料 LP40 あるいは LP70 を窒素成分で 4 g m⁻² 施用した区（それぞれ LP40 区, LP70 区とする）を設けた．茎立期追肥は 2011 年 3 月 8 日に硫安を窒素成分 0 あるいは 2 g m⁻² 施用した．開花期追肥は 5 月 6 日に硫安を窒素成分で 0, 4, 8 g m⁻² 施用した．試験区は，基肥と茎立期追肥を組み合わせた合計 6 処理区を 1 反復で設け，さらにこの中に開花期追肥を 2 反復で配置した．開花期追肥の 1 区面積は 9.6 m² であった．なお，いずれの処理区においても開花日は 2011 年 5 月 6 日，成熟日は 6 月 15 日であった．

2. 乾物重，収量，収量構成要素および子実タンパク質含有率の測定

2008/2009 年は，水田では 6 月 2 日，畑では 6 月 9 日に各区とも 0.18 m² を 8 ヶ所地際から刈り取り，このうち平均的な穂数を示した 6 ヶ所，合計 1.08 m² を収量調査に供した．2010/2011 年は，6 月 15 日に各区とも 0.3 m² を 10 ヶ所地際から刈り取り，このうち平均的な穂数を示した 8 ヶ所，合計 2.4 m² を収量調査に供した．

収量調査は「小麦調査基準 第 1 版」（農業研究センター 1986）に準じて，地上部風乾重，穂数，整子実重，整粒歩合，千粒重を計測した．地上部風乾重，整子実重，千粒重は水分含量 12.5 % での値に補正した．1 穂整粒数は整子実重，穂数，千粒重より計算によって求めた．子実タンパク質含有率は近赤外分析計（FOSS，インフラテック 1241 グレイアナライザー）で測定し，水分含量を 13.5 % に補正した値を用いた．

3. 窒素蓄積量の定量

植物体の窒素含有率（乾物重あたり）は，乾物を微粉碎後，NC アナライザー（（株）住化分析センター，SUMIGRAPH NC-22F）で定量した．面積あたりの植物体の窒素蓄積量は，窒素含有率と面積あたり乾物重の積として求めた．

窒素蓄積量は開花期および成熟期に測定した。開花期には、基肥量と茎立期追肥量が異なる各圃場合計 12 処理区の中から生育が中庸な場所を選び、株を根ごと抜き取った。採取日と採取した面積は、2008/2009 年ではそれぞれ 4 月 22 日、0.09 m²、2010/2011 年ではそれぞれ 5 月 6 日、0.15 m²であった。採取した株は根を切除後 80 °C で 2 日間通風乾燥し、窒素の分析に供した。2010/2011 年は、採取した植物体を葉、稈および葉鞘、穂に分けて分析に供した。

成熟期は 2008/2009 年では収量調査用に地際から刈り取った茎の中から長さの中庸な穂を持つ茎 30 本を選び、穂と茎葉部に切り分けて乾燥し、窒素の分析に供した。2010/2011 年は成熟日にそれぞれ生育が中庸な場所を選び、株を根ごと抜き取り、葉、稈および葉鞘、穂に分けて、窒素の分析に供した。採取した面積は 0.15 m²であった。

4. 穂の乾物重と窒素蓄積量の解析

前章と同様に、成熟期の穂の乾物重と窒素蓄積量は、Bancal (2009) の方法に基づいて、開花後に新たに同化された乾物や窒素（以下、それぞれ開花後同化乾物、開花後同化窒素とする）がすべて穂へ蓄積したと仮定し、次式に基づいて解析した。

$$(\text{開花後同化乾物量}) = (\text{成熟期の地上部乾物重}) - (\text{開花期の地上部乾物重})$$

$$(\text{開花後同化窒素量}) = (\text{成熟期の地上部窒素蓄積量}) - (\text{開花期の地上部窒素蓄積量})$$

$$(\text{開花前蓄積乾物量}) = (\text{成熟期の穂乾物重}) - (\text{開花後同化乾物重})$$

$$(\text{開花前蓄積窒素量}) = (\text{成熟期の穂窒素蓄積量}) - (\text{開花後同化窒素量})$$

5. 統計処理

統計処理は統計ソフト（SAS Institute Inc., JMP 8.0.1）を用いて行った。

結果

1. 水田と畑で生育したコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果

2008/2009年の整子実重、収量構成要素、子実タンパク質含有率を第 III-1 表に示した。まず、圃場間の比較をすると、整子実重は水田に比較して畑で有意に重かった。収量構成要素は水田に比較して畑では穂数と 1 穂整粒数が多く、整粒歩合が低く、千粒重が軽かった。子実タンパク質含有率は水田に比べ畑で高く、子実タンパク質含有率の増加割合は水田の方が畑よりも大きかった。

次に施肥の効果を見ると、基肥量が多い区では収量は重くなり、穂数が多く、千粒重は軽くなったが、整粒歩合と 1 穂整粒数には差は認められなかった。子実タンパク質含有率、子実タンパク質含有率の増加割合は、基肥量の影響を受けなかった。茎立期追肥量が多い区では、収量は重くなり、穂数が多く、1 穂整粒数が多かったが、整粒歩合と千粒重に違いは認められなかった。子実タンパク質含有率、子実タンパク質含有率の増加割合は、茎立期追肥量の影響を受けなかった。開花期追肥量が多い区では、収量は重くなり、整粒歩合が高く、千粒重が重くなったが、穂数には違いは認められなかった。また、1 穂整粒数は水田では差が認められなかったが、畑では開花期追肥量が多い区で多い傾向が認められた。子実タンパク質含有率、子実タンパク質含有率の増加割合は開花期追肥量が多い区で高かった。

水田と畑で栽培したコムギの開花期の地上部乾物重、成熟期の地上部乾物重、茎葉部乾物重、穂乾物重、開花前蓄積乾物量、開花後同化乾物量を、第 III-2 表に示した。圃場間で比較すると、開花期と成熟期の地上部乾物重、成熟期の穂乾物重と開花後同化乾物量は水田に比べて畑で有意に多く、開花前蓄積乾物量は水田の方が畑よりも有意に多かった。

施肥の効果を見ると、基肥は成熟期の地上部乾物重、穂乾物重を増やす効果があった。水田では、開花後同化乾物量は基肥によって重くなったが、畑では差が見られなかった。

第 III-1 表 水田と畑で栽培したコムギ (2008/2009 年) の施肥量と整子実重, 収量構成要素, 子実タンパク質含有率 (GPC).

試験圃場	基肥量 (g m ⁻²)	茎立期 追肥量 (g m ⁻²)	開花期 追肥量 (g m ⁻²)	整子実重 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	整粒歩合 (%)	1穂整粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)	GPC増加 割合 (%)	
水田	4	0	0	307.3	329.9	99.5	24.7	37.7	9.1	100	
	4	0	2	334.4	325.0	99.6	26.2	39.3	10.6	117	
	4	0	4	362.8	328.7	99.6	27.0	40.8	12.9	142	
	4	0	8	332.9	343.2	99.5	23.5	40.9	15.4	170	
	4	2	0	391.7	372.8	99.4	27.4	38.2	8.7	100	
	4	2	2	408.5	370.4	99.7	27.2	40.5	10.6	121	
	4	2	4	443.7	368.5	99.7	28.9	41.8	12.3	141	
	4	2	8	460.7	401.5	99.7	27.2	42.2	14.6	168	
	8	0	0	381.7	383.0	99.3	26.8	37.2	9.1	100	
	8	0	2	392.8	375.9	99.6	26.3	39.7	10.8	119	
	8	0	4	391.3	364.8	99.5	26.8	39.9	12.2	134	
	8	0	8	388.4	382.1	99.7	25.0	40.8	14.7	161	
	8	2	0	439.7	400.0	99.1	29.0	37.9	9.2	100	
	8	2	2	441.8	416.7	99.6	26.9	39.7	10.4	113	
	8	2	4	503.5	439.2	99.5	28.4	40.1	12.5	136	
	8	2	8	452.8	409.9	99.7	26.7	41.5	14.3	155	
	各基肥量での平均			4	380.3	355.0	99.6	26.5	40.2	11.8	133
				8	424.0	396.5	99.5	27.0	39.6	11.7	127
	各茎立期追肥量での平均			0	361.4	354.1	99.5	25.8	39.5	11.9	131
				2	442.8	397.4	99.6	27.7	40.2	11.6	129
各開花期追肥量での平均			0	380.1	371.5	99.3	27.0	37.8	9.0	100	
			2	394.4	372.0	99.6	26.7	39.8	10.6	118	
			4	425.3	375.3	99.6	27.8	40.7	12.5	138	
			8	408.7	384.2	99.6	25.6	41.4	14.7	164	
水田平均				402.1	375.7	99.5	26.7	39.9	11.7	132	
畑	2	0	0	554.6	463.0	98.8	31.9	37.5	12.8	100	
	2	0	2	546.7	446.6	98.9	32.7	37.4	13.4	105	
	2	0	4	612.4	460.8	99.0	35.0	38.0	13.7	107	
	2	0	8	620.7	484.0	98.9	33.9	37.8	14.3	112	
	2	2	0	606.0	507.1	98.3	32.3	36.9	12.8	100	
	2	2	2	606.0	484.3	98.9	33.6	37.2	13.4	105	
	2	2	4	669.2	521.3	98.6	34.1	37.7	13.4	104	
	2	2	8	641.1	490.7	98.9	34.4	38.0	14.6	114	
	4	0	0	558.9	468.8	98.8	32.0	37.2	12.6	100	
	4	0	2	614.1	488.9	98.8	33.4	37.4	13.4	107	
	4	0	4	611.2	469.4	99.1	34.2	38.1	13.9	110	
	4	0	8	613.9	471.3	99.2	33.9	38.4	14.6	116	
	4	2	0	625.4	495.1	98.0	34.5	36.7	12.9	100	
	4	2	2	620.7	495.4	98.6	33.7	37.3	13.4	103	
	4	2	4	621.2	495.7	98.7	34.0	36.8	13.5	104	
	4	2	8	645.8	506.8	98.8	34.5	36.9	14.3	110	
	各基肥量での平均			2	607.1	482.2	98.8	33.5	37.6	13.6	106
				4	613.9	486.4	98.8	33.8	37.3	13.6	106
	各茎立期追肥量での平均			0	591.6	469.1	98.9	33.4	37.7	13.6	107
				2	629.4	499.5	98.6	33.9	37.2	13.5	105
各開花期追肥量での平均			0	586.2	483.5	98.5	32.7	37.1	12.8	100	
			2	596.8	478.8	98.8	33.3	37.3	13.4	105	
			4	628.5	486.8	98.9	34.3	37.6	13.6	106	
			8	630.4	488.2	99.0	34.2	37.8	14.4	113	
畑平均				610.5	484.3	98.8	33.6	37.5	13.6	106	
ANOVA											
基肥				*	***	ns	ns	*	ns	ns	
茎立期追肥				***	***	ns	***	ns	ns	ns	
開花期追肥				**	ns	***	*	***	***	***	
基肥×茎立期追肥				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
圃場(変量効果)				**	**	**	***	**	***	***	
反復[圃場](変量効果)				***	***	**	**	*	ns	-	

数値はそれぞれの追肥区での全データの平均値を示す. 整粒歩合は角変換後, 統計処理を行った. ***, **, *はそれぞれ 0.1 %, 1 %, 5 %水準で有意差があること, ns は 5 %水準で有意差が無いことを示す. 子実タンパク質含有率の増加割合は, 基肥量, 茎立期追肥量が同じ開花期追肥量 0 g m⁻² 区の平均値を対照とした場合の%で示す.

第 III-2 表 水田と畑で栽培したコムギ (2008/2009 年) の開花期の地上部乾物重, 成熟期の地上部乾物重, 茎葉部乾物重, 穂乾物重, 開花前蓄積乾物量, 開花後同化乾物量.

圃場	基肥量 (g m ⁻²)	茎立期 追肥量 (g m ⁻²)	開花期 追肥量 (g m ⁻²)	開花期地上部 乾物重 (g m ⁻²)	成熟期地上部 乾物重 (g m ⁻²)	茎葉部 乾物重 (g m ⁻²)	穂 乾物重 (g m ⁻²)	開花前 蓄積乾物量 (g m ⁻²)	開花後 同化乾物量 (g m ⁻²)	
水田	4	0	0	681	769	234	535	447	87	
	4	0	2	681	784	265	519	417	103	
	4	0	4	681	856	304	552	377	175	
	4	0	8	681	812	257	556	425	131	
	4	2	0	866	994	420	574	446	128	
	4	2	2	866	993	409	584	457	127	
	4	2	4	866	1111	491	620	375	245	
	4	2	8	866	1189	477	712	389	323	
	8	0	0	734	1039	440	600	294	306	
	8	0	2	734	982	365	617	369	248	
	8	0	4	734	1004	424	580	310	271	
	8	0	8	734	968	321	647	413	234	
	8	2	0	982	1075	433	642	549	93	
	8	2	2	982	1197	526	672	456	216	
	8	2	4	982	1214	556	659	426	233	
	8	2	8	982	1149	447	702	535	167	
		各基肥量での 平均		4	774	939	357	582	417	165
		各茎立期追肥量 での平均		0	707	902	326	576	381	194
				2	924	1115	470	646	454	191
		各開花期 追肥量での 平均		0	816	969	382	588	434	154
			2	816	989	391	598	425	173	
			4	816	1047	444	603	372	231	
			8	816	1029	375	654	440	214	
	水田平均			816	1009	398	611	418	193	
畑	2	0	0	700	1153	391	763	310	453	
	2	0	2	700	1207	478	729	222	506	
	2	0	4	700	1257	464	793	236	557	
	2	0	8	700	1366	532	834	168	666	
	2	2	0	731	1284	424	860	307	553	
	2	2	2	731	1252	467	785	264	521	
	2	2	4	731	1378	477	901	254	647	
	2	2	8	731	1331	420	911	311	600	
	4	0	0	719	1215	398	817	320	497	
	4	0	2	719	1328	506	822	213	609	
	4	0	4	719	1283	452	831	266	565	
	4	0	8	719	1338	488	850	230	620	
	4	2	0	784	1348	484	864	300	564	
	4	2	2	784	1310	466	844	318	526	
	4	2	4	784	1341	475	867	309	557	
	4	2	8	784	1349	525	824	259	566	
		各基肥量での 平均		2	716	1279	457	822	259	563
				4	751	1314	474	840	277	563
		各茎立期追肥量 での平均		0	709	1269	464	805	246	559
				2	758	1324	467	857	290	567
	各開花期 追肥量での 平均		0	734	1250	424	826	309	517	
			2	734	1274	479	795	254	541	
			4	734	1315	467	848	266	582	
			8	734	1346	491	855	242	613	
	畑平均			734	1296	465	831	268	563	
ANOVA										
基肥				ns	*	ns	*	ns	*	
茎立期追肥				ns	ns	ns	**	ns	ns	
開花期追肥				ns	ns	ns	*	ns	ns	
基肥×茎立期追肥				***	ns	*	ns	*	ns	
圃場(変量効果)				ns	**	**	***	*	**	
反復[圃場](変量効果)				***	**	ns	***	***	***	

***, **, *はそれぞれ 0.1 %, 1 %, 5 %水準で有意差があることを, ns は 5 %水準で有意差が無いことを示す.

茎立期追肥と開花期追肥は成熟期の穂乾物重を増やした。

水田と畑で栽培したコムギの開花期の地上部窒素蓄積量，成熟期の地上部窒素蓄積量，茎葉部窒素蓄積量，穂窒素蓄積量，開花前蓄積窒素量，開花後同化窒素量を，第 III-3 表に示した。圃場間で比較すると，成熟期の地上部窒素蓄積量，茎葉部窒素蓄積量，穂窒素蓄積量，開花前蓄積窒素量は水田に比べて畑で多かった。

施肥の効果をみると，基肥は開花期地上部窒素蓄積量と開花前蓄積窒素量を増やした。茎立期追肥は開花期地上部窒素蓄積量，成熟期地上部窒素蓄積量，茎葉部窒素蓄積量，穂窒素蓄積量，開花前蓄積窒素量を増やした。開花期追肥は成熟期地上部窒素蓄積量，茎葉部窒素蓄積量，穂窒素蓄積量，開花後同化窒素量を増やしたが，開花前蓄積窒素量には有意な影響を及ぼさなかった。開花期追肥量が 0 g m^{-2} から 8 g m^{-2} まで増えた時の開花後同化窒素量の増加量は，水田では 8.7 g m^{-2} であったのに対し，畑では 3.7 g m^{-2} と少なかった。開花期追肥量 8 g m^{-2} のとき，穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量の割合は，水田では 3 割であったのに対して，畑では 5 割と大きかった。

2. 基肥量と茎立期追肥量の異なるコムギにおける開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める効果

2010/2011 年の整子実重，収量構成要素，子実タンパク質含有率を第 III-4 表に示した。まず，基肥の種類と量の効果をみると，整子実重は LP40 区，LP70 区が化成区より有意に重かった。穂数は LP40 区が最も多く，ついで LP70 区，化成区が最も少なかった。整粒歩合は化成区が LP40 区，LP70 区よりも有意に高かった。1 穂粒数は LP40 区，LP70 区が化成区より有意に多かった。子実タンパク質含有率の増加割合は，化成区が最も大きく，次いで LP70 区，LP40 区の順に大きかった。千粒重は基肥の種類と量の影響を受けなかった。子実タンパク質含有率は基肥の種類と量の影響は有意では無かったが，LP40 区で最も高く，化成区で最も低かった。

第 III-3 表 水田と畑で栽培したコムギ (2008/2009 年) の成熟期の地上部窒素蓄積量, 茎葉部窒素蓄積量, 穂窒素蓄積量, 開花前蓄積窒素量, 開花後同化窒素量.

圃場	基肥量 (g m ⁻²)	茎立期 追肥量 (g m ⁻²)	開花期 追肥量 (g m ⁻²)	開花期地上 部窒素蓄積 量 (g m ⁻²)	成熟期地上 部窒素蓄積 量 (g m ⁻²)	茎葉部 窒素蓄積量 (g m ⁻²)	穂窒素 蓄積量 (g m ⁻²)	開花前 蓄積窒素量 (g m ⁻²)	開花後 同化窒素 量 (g m ⁻²)	
水田	4	0	0	5.6	9.3	0.8	8.4	4.8	3.6	
	4	0	2	5.6	10.0	0.8	9.3	4.9	4.4	
	4	0	4	5.6	13.2	1.1	12.1	4.5	7.6	
	4	0	8	5.6	17.0	1.5	15.6	4.2	11.4	
	4	2	0	7.9	9.6	0.9	8.7	7.0	1.7	
	4	2	2	7.9	11.0	0.9	10.1	7.0	3.1	
	4	2	4	7.9	15.2	1.2	14.0	6.7	7.3	
	4	2	8	7.9	21.2	1.9	19.3	6.0	13.3	
	8	0	0	6.2	10.3	1.1	9.2	5.1	4.0	
	8	0	2	6.2	12.7	1.1	11.7	5.2	6.5	
	8	0	4	6.2	12.4	1.1	11.3	5.1	6.1	
	8	0	8	6.2	17.8	1.5	16.3	4.8	11.6	
	8	2	0	8.6	11.2	1.1	10.1	7.5	2.6	
	8	2	2	8.6	13.2	1.3	11.9	7.3	4.6	
	8	2	4	8.6	14.9	1.4	13.5	7.2	6.4	
	8	2	8	8.6	19.2	1.6	17.7	7.0	10.6	
		各基肥量での 平均		4	6.8	13.3	1.1	12.2	5.6	6.5
		各茎立期追肥量 での平均		0	5.9	12.8	1.1	11.7	4.8	6.9
		各開花期 追肥量での 平均		0	7.1	10.1	1.0	9.1	6.1	3.0
				2	7.1	11.7	1.0	10.7	6.1	4.6
			4	7.1	13.9	1.2	12.7	5.9	6.8	
			8	7.1	18.8	1.6	17.2	5.5	11.7	
	水田平均			7.1	13.6	1.2	12.4	5.9	6.5	
畑	2	0	0	11.5	18.7	1.9	16.7	9.6	7.2	
	2	0	2	11.5	19.0	2.1	16.9	9.4	7.5	
	2	0	4	11.5	21.2	2.5	18.7	9.1	9.7	
	2	0	8	11.5	23.2	3.2	20.0	8.3	11.7	
	2	2	0	14.9	21.3	2.6	18.7	12.3	6.5	
	2	2	2	14.9	20.1	2.5	17.6	12.4	5.2	
	2	2	4	14.9	23.5	2.9	20.5	11.9	8.6	
	2	2	8	14.9	25.7	3.5	22.1	11.3	10.8	
	4	0	0	13.4	20.0	2.3	17.7	11.1	6.6	
	4	0	2	13.4	21.0	2.5	18.5	10.9	7.6	
	4	0	4	13.4	22.2	2.7	19.5	10.7	8.8	
	4	0	8	13.4	24.1	3.0	21.1	10.4	10.7	
	4	2	0	15.3	21.6	2.8	18.7	12.5	6.2	
	4	2	2	15.3	21.6	2.6	19.1	12.8	6.3	
	4	2	4	15.3	23.5	3.4	20.1	12.0	8.2	
	4	2	8	15.3	23.1	3.4	19.8	12.0	7.8	
		各基肥量での 平均		2	13.2	21.6	2.7	18.9	10.5	8.4
		各茎立期追肥量 での平均		0	12.5	21.2	2.5	18.6	9.9	8.7
		各開花期 追肥量での 平均		0	13.8	20.4	2.4	18.0	11.4	6.6
				2	13.8	20.4	2.4	18.0	11.4	6.6
			4	13.8	22.6	2.9	19.7	10.9	8.8	
			8	13.8	24.0	3.3	20.7	10.5	10.3	
	畑平均			13.8	21.9	2.7	19.1	11.0	8.1	
ANOVA										
基肥				**	ns	ns	ns	**	ns	
茎立期追肥				***	*	*	*	***	ns	
開花期追肥				ns	***	***	***	ns	***	
基肥×茎立期追肥				ns	ns	ns	ns	ns	ns	
圃場(変量効果)				***	***	***	***	***	ns	
反復圃場(変量効果)				ns	ns	ns	ns	ns	*	

データはそれぞれの水準について平均したものを示した. ***, **, *はそれぞれ 0.1 %, 1 %, 5% 水準で有意差があることを, ns は 5 %水準で有意差が無いことを示す.

第 III-4 表 基肥の種類と量，茎立期窒素追肥量，開花期窒素追肥量が整子実重，収量構成要素，子実タンパク質含有率 (GPC)，子実タンパク質含有率の増加割合に及ぼす影響 (2010/2011 年)。

基肥		茎立期窒素追肥量 (g m ⁻²)	開花期窒素追肥量 (g m ⁻²)	整子実重 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	整粒歩合 (%)	1穂粒数 (粒)	千粒重 (g)	GPC (%)	GPC増加割合 (%)
化成	7	0	0	389.5	431	99.4	26.0	34.9	9.7	100
			4	425.2	443	99.6	27.3	35.1	12.3	127
			8	411.4	423	99.6	27.4	35.6	14.8	153
		2	0	388.0	389	99.3	27.8	35.9	10.1	100
			4	434.8	408	99.5	29.4	36.2	13.2	131
			8	423.8	395	99.6	29.5	36.5	15.4	153
LP40	11 (4)	0	0	568.9	535	98.8	30.4	35.0	11.3	100
			4	469.5	475	99.1	27.0	36.6	13.5	120
			8	548.3	517	99.0	30.1	35.3	13.1	116
		2	0	605.6	561	98.2	31.0	34.8	12.1	100
			4	636.8	550	99.1	32.0	36.1	13.5	112
			8	587.0	512	98.4	32.1	35.7	14.1	117
LP70	11 (4)	0	0	508.2	478	99.0	29.9	35.6	10.8	100
			4	507.0	473	99.6	29.2	36.6	12.8	118
			8	589.5	501	99.4	32.4	36.4	14.2	131
		2	0	544.9	495	98.1	31.7	34.7	11.7	100
			4	546.4	471	98.6	32.4	35.7	13.3	114
			8	561.0	516	98.3	31.2	34.8	14.2	122
各基肥種類での平均値			化成	412.1 b	415 c	99.5 a	27.9 b	35.7	12.5	127 a
			LP40	569.4 a	525 a	98.8 b	30.4 a	35.6	12.9	111 c
			LP70	541.2 a	478 b	98.9 b	31.1 a	35.7	12.7	114 b
各茎立期窒素追肥量での平均値			0	490.8 b	475	99.3 a	28.9 b	35.7	12.5 b	128
			2	523.3 a	475	98.8 b	30.8 a	35.7	13.0 a	116
各開花期窒素追肥量での平均値			0	500.8	481	98.8 b	29.5	35.2 b	10.9 c	100 c
			4	503.3	470	99.2 a	29.6	36.1 a	13.1 b	120 b
			8	516.5	474	99.1 ab	30.4	35.8 a	14.3 a	133 a
ANOVA										
基肥種類 (A)				***	***	***	**	ns	ns	***
茎立期窒素追肥量 (B)				*	ns	***	**	ns	***	ns
開花期窒素追肥量 (C)				ns	ns	**	ns	***	***	***
A×B				ns	*	***	ns	***	ns	ns
A×C				ns	ns	ns	ns	ns	***	***
B×C				ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

基肥の種類「化成」では即効性化成肥料のみを，「LP40」，「LP70」では即効性化成肥料に加えて緩効性肥料を施用した。基肥窒素量には基肥として施用した全窒素量を，括弧書きはそのうち緩効性肥料による施肥量を示す。数値はそれぞれの水準での全データの平均値 (n=2) を示す。ただし，基肥 LP70，茎立期窒素追肥量 2 g m⁻²，開花期窒素追肥量 8 g m⁻² の区は 1 点の欠測値あり (第 III-5 表，第 III-6 表も同様)。整粒歩合は角変換後，統計処理を行った。子実タンパク質含有率の増加割合は，基肥処理，茎立期窒素追肥量が同じ開花期窒素追肥量 0 g m⁻² 区を対照とした場合の%で示す。同一アルファベットの付いた平均値間には 5 %水準の有意差が無いことを示す (Tukey 法)。***，**，*はそれぞれ 0.1 %，1 %，5 %水準で有意差があること，ns は 5 %水準で有意差が無いことを示す。

茎立期窒素追肥は整子実重を増やし、整粒歩合を下げ、1穂粒数を増やした。また、茎立期窒素追肥は子実タンパク質含有率を高めたが、子実タンパク質含有率増加割合には有意な影響を及ぼさなかった。

開花期窒素追肥は整子実重に有意な影響を及ぼさなかったが、整粒歩合は開花期窒素追肥量 4 g m^{-2} 区が最も高く、次いで 8 g m^{-2} 区で、 0 g m^{-2} 区が最も低かった。千粒重は開花期窒素追肥量 4 g m^{-2} 区が最も重く、 0 g m^{-2} 区が最も軽かった。子実タンパク質含有率は開花期窒素追肥量 8 g m^{-2} 区が最も高く、次いで 4 g m^{-2} 区、 0 g m^{-2} 区が最も低かった。子実タンパク質含有率増加割合は 4 g m^{-2} 区に比べ 8 g m^{-2} 区が有意に高かった。

基肥の種類、茎立期追肥量、開花期追肥量が開花期の地上部乾物重、成熟期地上部乾物重、成熟期茎葉部乾物重、成熟期穂乾物重、成熟期穂乾物重に占める開花前蓄積乾物量および開花後同化乾物量に及ぼす影響を第 III-5 表に示した。まず、基肥の種類の効果を見ると、成熟期地上部乾物重は LP40 区、LP70 区が化成区よりも有意に重かった。成熟期茎葉部乾物重は LP40 区が最も重く、化成区が最も軽かった。開花期地上部乾物重および開花前蓄積乾物量は、基肥の種類の影響を受けなかった。

次に茎立期窒素追肥量の効果をみると、茎立期追肥量は、これら乾物重に有意な影響を及ぼさなかった。開花期窒素追肥量は成熟期穂乾物重に有意な影響を及ぼし、開花期窒素追肥量 8 g m^{-2} 区が最も多く、 0 g m^{-2} 区が最も少なかった。穂乾物重が異なった要因を開花前蓄積乾物量と開花後同化乾物量に分けてみると、どちらも開花期追肥量による影響は有意では無かったものの、開花期追肥量が多い区で多くなる傾向があったためであった。

基肥の種類、茎立期窒素追肥量、開花期窒素追肥量が開花期地上部窒素蓄積量、成熟期の地上部窒素蓄積量、成熟期の茎葉部窒素蓄積量、成熟期の穂窒素蓄積量、成熟期の穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量および開花後同化窒素量に及ぼす影響を第 III-6 表に示した。まず、基肥の種類の影響をみると、開花期地上部窒素蓄積量、成熟期地上部窒素蓄積量、成熟期穂窒素蓄積量、開花前蓄積窒素量はいずれも LP40 区が最も多く、化成区

第 III-5 表 基肥の種類と量，茎立期追肥量，開花期追肥量が開花期の地上部乾物重，成熟期の地上部乾物重，成熟期の茎葉部乾物重，成熟期の穂乾物重，開花前蓄積乾物量，開花後同化乾物量に及ぼす影響。

基肥種類	茎立期窒素追肥量 (g m ⁻²)	開花期窒素追肥量 (g m ⁻²)	開花期地上部乾物重 (g m ⁻²)	成熟期地上部乾物重 (g m ⁻²)	成熟期茎葉部乾物重 (g m ⁻²)	成熟期穂乾物重 (g m ⁻²)	開花前蓄積乾物量 (g m ⁻²)	開花後同化乾物量 (g m ⁻²)
化成	0	0	831	1118	547	570	283	287
		4	803	1135	566	569	237	332
		8	964	1114	530	585	434	151
	2	0	914	983	467	516	447	69
		4	986	1099	509	590	477	113
		8	927	1089	504	585	423	162
LP40	0	0	965	1231	548	683	417	266
		4	813	1321	597	724	216	508
		8	922	1565	659	906	262	643
	2	0	856	1342	583	759	273	486
		4	963	1323	587	735	376	360
		8	700	1319	556	763	144	619
LP70	0	0	753	1162	537	625	216	409
		4	727	1161	559	601	168	434
		8	952	1381	601	780	351	428
	2	0	779	1230	559	671	220	451
		4	920	1228	519	709	402	308
		8	1076	1296	581	715	495	220
各基肥種類での平均値	化成	904	1090 _b	521 _b	569 _c	384	185 _b	
	LP40	870	1350 _a	588 _a	762 _a	281	480 _a	
	LP70	849	1238 _a	557 _{ab}	681 _b	292	389 _a	
各茎立期窒素追肥量での平均値	0	859	1243	572	672	287	384	
	2	892	1207	538	669	354	315	
各開花期窒素追肥量での平均値	0	850	1178	540	637 _b	309	328	
	4	869	1211	556	655 _{ab}	312	342	
	8	909	1294	571	723 _a	339	384	
ANOVA								
基肥種類 (A)			ns	*	**	***	ns	*
茎立期窒素追肥量 (B)			ns	ns	ns	ns	ns	ns
開花期窒素追肥量 (C)			ns	ns	ns	*	ns	ns
A×B			ns	ns	ns	ns	ns	ns
A×C			ns	ns	ns	ns	ns	ns
B×C			ns	ns	ns	ns	ns	ns

数値はそれぞれの水準での全データの平均値を示す。分散分析の結果，すべての交互作用項は有意では無かったため，交互作用項を誤差に含めて検定を行った結果を示した。同一アルファベットの付いた平均値間には 5 %水準の有意差が無いことを示す (Tukey 法)。***, **, *はそれぞれ 0.1 %, 1 %, 5 %水準で有意差があることを，ns は 5 %水準で有意差が無いことを示す。

第 III-6 表 基肥の種類と量，茎立期追肥量，開花期追肥量が開花期の地上部窒素蓄積量，成熟期の地上部窒素蓄積量，成熟期の茎葉部窒素蓄積量，成熟期の穂窒素蓄積量，開花前蓄積窒素量，開花後同化窒素量に及ぼす影響.

基肥種類	茎立期 窒素 追肥量 (g m ⁻²)	開花期 窒素 追肥量 (g m ⁻²)	開花期 地上部 窒素 蓄積量 (g m ⁻²)	成熟期 地上部 窒素 蓄積量 (g m ⁻²)	成熟期 茎葉部 窒素 蓄積量 (g m ⁻²)	成熟期 穂窒素 蓄積量 (g m ⁻²)	開花前 蓄積窒 素量 (g m ⁻²)	開花後 同化 窒素量 (g m ⁻²)
化成	0	0	8.7	11.7	1.9	9.7	6.8	3.0
		4	8.5	16.1	2.6	13.5	5.9	7.7
		8	10.6	19.5	3.0	16.5	7.6	9.0
	2	0	10.8	11.4	1.7	9.7	9.1	0.6
		4	9.4	14.6	1.8	12.9	7.6	5.2
		8	9.7	18.3	2.6	15.7	7.1	8.6
LP40	0	0	13.4	15.4	2.7	12.7	10.7	2.0
		4	12.2	15.1	2.4	12.7	9.8	2.9
		8	13.6	22.4	3.9	18.5	9.7	8.8
	2	0	14.4	18.0	3.5	14.4	10.9	3.6
		4	15.5	21.4	4.0	17.5	11.5	5.9
		8	12.9	21.3	4.2	17.1	8.7	8.4
LP70	0	0	9.3	13.2	2.1	11.1	7.2	3.9
		4	9.6	17.0	2.7	14.3	6.9	7.4
		8	12.6	22.4	3.9	18.5	8.7	9.7
	2	0	10.1	16.0	2.6	13.4	7.5	5.9
		4	13.9	18.2	2.7	15.5	11.2	4.3
		8	18.2	21.4	3.7	17.6	14.5	3.2
各基肥種類での平均値	化成		9.6 ^b	15.3 ^b	2.3 ^b	13.0 ^b	7.3 ^b	5.7
	LP40		13.7 ^a	18.9 ^a	3.4 ^a	15.5 ^a	10.2 ^a	5.3
	LP70		11.8 ^{ab}	17.7 ^{ab}	2.9 ^a	14.8 ^{ab}	8.9 ^{ab}	5.7
各茎立期窒素追肥量 での平均値	0		10.9 ^b	17.0	2.8	14.2	8.1 ^b	6.0
	2		12.4 ^a	17.6	2.9	14.7	9.5 ^a	5.2
各開花期窒素追肥量 での平均値	0		11.1	14.3 ^b	2.4 ^b	11.9 ^c	8.7	3.2 ^b
	4		11.5	17.1 ^b	2.7 ^b	14.4 ^b	8.8	5.6 ^{ab}
	8		12.5	20.8 ^a	3.5 ^a	17.3 ^a	8.9	8.4 ^a
ANOVA								
基肥種類 (A)			**	*	***	*	*	ns
茎立期窒素追肥量 (B)			*	ns	ns	ns	*	ns
開花期窒素追肥量 (C)			ns	***	***	***	ns	***
A×B			ns	ns	*	ns	ns	ns
A×C			ns	ns	ns	ns	ns	ns
B×C			ns	ns	ns	ns	ns	ns

数値はそれぞれの水準での全データの平均値を示す。分散分析の結果，すべての交互作用項は有意では無かったため，交互作用項を誤差に含めて検定を行った結果を示した。同一アルファベットの付いた平均値間には5%水準の有意差が無いことを示す (Tukey法)。***, **, *はそれぞれ0.1%, 1%, 5%水準で有意差があることを，nsは5%水準で有意差が無いことを示す。

が最も少なかった。成熟期茎葉部窒素蓄積量，開花後同化窒素量は基肥の種類と量の影響を受けなかった。成熟期穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量の割合は化成区で 56 % と最も低く，LP40 区で 66 %，LP70 区では 60 % だった。茎立期窒素追肥は開花期地上部窒素蓄積量，開花前蓄積窒素量を増やす効果があった。開花期窒素追肥は成熟期地上部窒素蓄積量，成熟期茎葉部窒素蓄積量，成熟期穂窒素蓄積量，開花後同化窒素量に有意な影響を及ぼし，いずれも開花期追肥量 8 g m^{-2} 区が最も多く， 0 g m^{-2} 区が最も少なかった。

考察

開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率に及ぼす影響を 2008/2009 年において水田と畑の間で比較した。その結果，水田と畑の両方で開花期追肥は有意に子実タンパク質含有率を高めること，開花期追肥量 8 g m^{-2} を除き，子実タンパク質含有率は水田に比べて畑で高いこと，開花期追肥量 1 g m^{-2} 当たりの子実タンパク質含有率の増加程度は，水田が畑よりも有意に高いこと（第 III-1 表）が明らかになった。開花期窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める原因は，前章と同様，開花期追肥が開花後同化乾物量を増やさなかったのに対し，開花後同化窒素量を増加させたためであった（第 III-2 表，第 III-3 表）。

追肥窒素量が等しくても，開花期追肥量 8 g m^{-2} を除き，子実タンパク質含有率は水田に比べて畑で高かった（第 III-1 表）。田野崎ら（1985）は普通畑に比べて水田転換畑では子実タンパク質含有率が低いことを，佐藤ら（1992）は黒ボク土，灰色低地土，赤色土の順に子実タンパク質含有率が高いことを報告している。本研究においても栽培圃場の土壌の種類や，水田，畑という地目の違いが子実タンパク質含有率の差を引き起こしたと考えられる。水田に比べ畑では開花期の地上部窒素蓄積量が多く，開花前蓄積窒素が多いことによって成熟期の穂窒素蓄積量が多かった（第 III-3 表）。開花期までに吸収された窒素は葉などの栄養生長器官に分配され，その結果乾物生産量が増加したと考えられ，水田に比べ畑では，開花後同化乾物量が多いことによって成熟期の穂乾物重が多かった（第 III-2

表). このように, 畑は水田に比べ成熟期の穂乾物重と穂窒素蓄積量の両方が多くなった (第 III-2 表, 第 III-3 表). 水田と畑で成熟期の穂乾物重と穂窒素蓄積量を比較すると, それぞれ畑は水田の 136 %, 154 %であった. このように, 開花期追肥量 8 g m^{-2} 区を除いて, 子実タンパク質含有率が水田に比べ畑で高かったのは, 成熟期の穂乾物重に比べて穂窒素蓄積量の圃場間差が大きかったためであった (第 III-2 表, 第 III-3 表).

一方, 開花期追肥量あたりの子実タンパク質含有率の増加割合は, 水田の方が畑よりも有意に大きかった (第 III-1 表). 開花期追肥量によって開花後同化乾物量は影響を受けなかったのに対して, 開花期追肥量を 0 g m^{-2} から 8 g m^{-2} に増やすと開花後同化窒素量の増加量は水田で 8.7 g m^{-2} , 畑では 3.7 g m^{-2} と水田の方が多かった (第 III-3 表) ためであった. 成熟期穂窒素蓄積量は開花時に決定しているシンクの需要量によって決定される (Triboi and Triboi-Blondel 2002), 成熟期穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量は開花期の栄養生長器官の窒素量と密接な正の相関があることが知られている (Barbottin ら 2005, Bancal 2009). 畑の穂窒素蓄積量は開花期窒素追肥量 4 g m^{-2} 区と 8 g m^{-2} 区の間には有意差が無いことから, 4 g m^{-2} の開花期窒素追肥によって畑のシンクの需要量はほぼ満たされていたものと推察された. このように畑では水田に比べ少ない開花期窒素追肥量でシンク需要量が満たされた理由として, 開花期地上部窒素蓄積量が水田に比べ畑で著しく多く, さらに開花後も引き続き土壌からの窒素供給が水田に比べて畑で多かったためと考えられた (第 III-3 表).

そこで 2010/2011 年には, 開花期の地上部窒素蓄積量が異なることが開花前蓄積窒素量の違いを通じて開花期追肥の子実タンパク質含有率向上効果に影響することを確認することを目的として, 同一の圃場生育するコムギにおいて開花期の窒素蓄積量を変え, 開花期追肥量を 3 水準設けて子実タンパク質含有率に及ぼす影響をみた. 開花期の窒素蓄積量を変えるために, 基肥の種類と量, 茎立期の追肥量を変えた. すなわち, 基肥として化成肥料に加えて, 緩効性窒素肥料を加えた区 (以降 LP 区とする, LP40 区と LP70 区) を設け,

さらに茎立期追肥の有無を設けて検討した。

その結果、開花期地上部窒素蓄積量は基肥の種類と量や茎立期追肥の有無の影響を受け、化成区よりも LP 区で多く、茎立期追肥量 0 g m^{-2} 区よりも 2 g m^{-2} 区が多かった(第 III-6 表)。また、開花期地上部窒素蓄積量が多い区で開花前蓄積窒素量が多くなった(第 III-6 表)。このような開花期地上部窒素蓄積量が異なる条件において、等しい量の開花期窒素追肥を施用すると、子実タンパク質含有率は基肥処理の影響は有意では無かったが、LP40 区が化成区よりも高い傾向があり、茎立期追肥量 0 g m^{-2} 区よりも 2 g m^{-2} 区で子実タンパク質含有率が高かった(第 III-4 表)。子実タンパク質含有率の増加割合は化成区の方が LP40 区よりも大きく、茎立期追肥量による差は有意では無かった(第 III-4 表)。

開花期地上部窒素蓄積量が多い LP 区、茎立期追肥量 2 g m^{-2} 区では、開花前蓄積窒素量も多く、LP 区では成熟期穂窒素蓄積量も多かった(第 III-6 表)。開花後同化乾物量、成熟期穂乾物重は LP 区が化成区よりも有意に多かったが、茎立期追肥量の違いによってこれらの値は影響を受けず(第 III-5 表)、水田と畑の間にみられた違いと一部一致した。

以上の結果は、2008/2009 年の水田と畑の違いの一部分が、開花前の窒素吸収量の違いによって起こり、畑と水田の間に見られるような子実タンパク質含有率の違い、および開花期追肥の子実タンパク質含有率の増加程度の違いが、基肥の種類と量、茎立期追肥によって一部再現ができることが分かった。土壌の種類によって出穂期の窒素追肥が子実タンパク質含有率を高める程度が異なることについて、中辻(2003)は、土壌の窒素肥沃度等の違いに起因する追肥時のコムギ地上部窒素含有量の差異が原因であると推察したが、本章の結果はこの説を支持するものであった。

一般的に、水田で栽培されたコムギは子実タンパク質含有率が低く(田野崎ら 1985, 渡邊 2010)、製パン性が劣る(田中ら 1983)といわれるが、水田においても適切に追肥を行うことで、コムギの子実タンパク質含有率を畑と同じレベルまで高められることが示された(第 III-1 表)。田中ら(1983)の報告した水田と畑のコムギの製パン性の差異は、子

実タンパク質含有率に起因するものが大きかったため、追肥によって水田のコムギの子実タンパク質含有率を高めることで、製パン製は大きく改善するものと予想される。しかし、子実タンパク質含有率が同じでも、グリアジンに対するグルテニンの比が異なることが製パン製に影響することも報告されている (Uthayakumaran ら 1999, Uthayakumaran and Lukow 2005)。このことは、水田と畑のコムギの製パン性の違いは、子実タンパク質含有率の差異だけでは説明できないことを示唆しており、今後検討が必要である。

第 IV 章. 開花期窒素追肥が子実と小麦粉の品質に及ぼす影響

—栽培圃場間差に着目して—

畑に比べて子実タンパク質含有率が低いことが多い水田で栽培されたコムギ（田野崎ら 1985, 渡邊 2010）でも，開花期追肥を適切に行うことで子実タンパク質含有率を畑と同程度にまで高めることができた（第 III 章）. 田中ら（1983）は畑のコムギに比べ水田のコムギの製パン性が劣ることを報告し，その要因は子実タンパク質含有率が畑に比べ水田で低かったためであると考察した．従って，追肥によって水田のコムギの子実タンパク質含有率を高くできれば，水田のコムギの製パン性は大きく改善するものと予想される．開花期追肥は主に子実タンパク質含有率を高めることでコムギの品質や製パン性に影響を与えることが報告されている（岩渕ら 2007）. 一方で子実タンパク質含有率が等しくても，製パン性に関わる生地物性の強さやパン比容積，グルテンを構成するタンパク質の種類は品種間で異なることが報告されている（Gupta and MacRitchie 1994, Takata ら 2000, 岩渕ら 2007, 谷中ら 2011）. このことは，品種によっては子実タンパク質含有率を高めても製パン性が向上しない可能性があることを示唆するものである．しかし，同一品種において子実タンパク質含有率以外の要因が製パン性などの品質に及ぼす影響について検討を行った研究はほとんどない．そこで，本章では水田における製パン用の高品質コムギの栽培法の検討の次のステップとして，水田と畑で栽培したコムギの製パン性に関する小麦粉の生地物性（ファリノグラム）を，等しいタンパク質含有率で比較した．

小麦粉の生地物性を示す項目の 1 つである吸水率は，子実タンパク質含有率が高いほど高くなる（岩渕ら 2007）. しかし，タンパク質含有率が同じでも吸収率が異なることがあり，それには損傷デンプン量（Meredith ら 1966, Sharma and Bains 1974），細胞壁多糖であるアラビノキシランの量（Michniewicz ら 1991, Biliaderis ら 1995），タンパク質の組成（Ohm ら 2010）が関与する．そこで，生地物性の違いを生む小麦粉の品質とし

て、損傷デンプン量，アラビノキシラン量，タンパク質の分画定量を行った．

材料と方法

1. 供試品種と栽培方法

コムギ品種ユメシホウを用いて，2008/2009年に茨城県つくば市観音台の農研機構内の水田圃場と畑圃場で栽培した．栽培方法，施肥処理は第III章の2008/2009年と同じであった．このうち基肥処理はまとめて，各圃場茎立期追肥2水準，開花期追肥4水準，合計8処理区について製粉した（第IV-1表）．

2. 製粉方法

製粉数日前に手動ロール型粉砕器で粉砕したコムギ子実約3gを135℃で1時間乾燥し，子実水分を測定した．製粉前日に秤量したコムギ子実をポリビンに入れ，目標水分16.0%となるように加水して1時間振とうし，室温で製粉まで放置した（テンパリング）．

製粉は農林水産技術会議事務局（1968）の方法でビューラー製粉機を用いて行い，B1～B3，M1～M3粉を得た．得られた粉を調整し，小麦粉（60%粉）を得た．

3. 小麦粉の品質の測定

小麦粉および原粒のタンパク質含有率は，それぞれの窒素含有率をNCアナライザー（SUMIGRAPH NC-22F，（株）住化分析センター）で測定し，タンパク換算定数（小麦粉は5.70，原粒は5.83）を乗じて求めた．容積重は電気式穀粒水分計（PM-830-2，（株）ケックト科学研究所）で測定した．

灰分，穂発芽の指標であるフォーリングナンバーは農林水産技術会議事務局（1968）の方法に準じて測定した．灰分は，空焼きしたるつぼにサンプルを3g入れ，助燃剤を3mL加えてから，300℃で2時間30分，600℃で6時間燃焼後，180℃に冷却した．取り出

したるつぼは、直ちにデシケーターに入れて室温まで冷却し、重量を測定して灰分を算出した。灰分は小麦粉水分 13.5 %の値に換算して示した。助燃剤は、酢酸マグネシウム 15 g を純水 150 mL, 氷酢酸 2 mL に溶解後、メタノールを加えて 1 L に定容して作製した。フォーリングナンバーは原粒粉を用い、フォーリングナンバー測定機 (FN1900, ペルテン) で測定した。原粒粉はコムギ子実を 1 mm メッシュスクリーンを装着したサイクロンサンプリル (CSM-S1, (株) 藤原製作所) で粉碎して作成した。

小麦粉生地の物理性の測定にはファリノグラフ (ファリノグラフ E, ブラベンダー) を用い、農林水産技術会議事務局 (1968) の方法に準じて測定し、吸水率、生地形成時間 (DT), バロリメーターバリュウ (VV) の値を求めた。

4. 製パン試験

製パン試験はストレート法 (田中・松本 1991) により行った。すなわち、小麦粉 200 g に対して塩 4 g, 砂糖 10 g, イースト 2.4 g, アスコルビン酸 30 ppm の割合で配合し、吸水率はファリノグラフの値を参考にして決定した。縦型ミキサーで 1 分間ミキシング後、ショートニングを 10 g 投入し、再度ミキシングして生地を形成した。生地のこね上げ温度は 27 °C とした。一次発酵は 30 °C, 湿度 85 % で 50 分実施し、ガス抜き後に同条件でさらに 30 分実施した。生地を 170g×2 個に分割し、成形して焼き型に詰め、38 °C, 湿度 85 % で 55 分最終発酵させた。焼成は上火 205~210 °C, 下火 235 °C に設定したオーブンで 18 分実施した。焼成終了後直ちに型から取りだし、パンの重量、体積を測定し、パン比容積 (体積/重量) を求めた。パン体積はナタネ置換法により測定した。焼成後のパンは室温に 1 時間放置し、ビニール袋に入れて保存した。焼成 1 日後にパンの柔らかさの指標となるコンプレッションをテクスチャーアナライザー (TA. XTplus, Stable Micro System) を用いて AACC 法に準じて求めた。

5. 小麦粉中のタンパク質の分画定量

タンパク質の組成は Yanaka ら (2007) の方法を用いて, SDS 可溶性のポリマー画分 (EPP), モノマー画分 (EMP), SDS 不溶性のポリマー画分 (UPP), モノマー画分 (EMP) を定量した. 小麦粉 10 mg を 0.5 % (w/v) SDS-50 mM リン酸ナトリウムバッファ (pH6.9) 1.0 mL に溶解し, 10 秒間ボルテックス後に 2000 rpm で 5 分間攪拌し, 12000 g で 20 分間遠心分離後, 上清を可溶性タンパク質画分とした. 沈殿はリン酸ナトリウムバッファに再溶解して, 超音波破碎 (島津製, USP-600A) した. これを 12000 g で 20 分間遠心分離し, 上清を不溶性タンパク質画分とした. 両画分の溶液は 80 °C で 2 分間加熱処理後, 0.45 μ m フィルターを通した. SE-HPLC 分析は島津 LC-10A システムで TSKgel G4000SW カラム (東ソー バイオサイエンス製) を用いた. 0.05 % (v/v) トリフルオロ酢酸を含む 50 %アセトニトリルを溶離液として流速 0.5 mL min⁻¹, サンプル量を 20 μ L とし, 紫外線 214 nm の吸収量でタンパク質を定量した. 得られたクロマトグラムを Gupta ら (1993) に準じて高分子量と低分子量に分割し, それぞれの面積を高分子量タンパク質画分量, 低分子量タンパク質画分量とし, 全タンパク質含量に占めるそれぞれの画分の割合を算出した.

6. アラビノキシランの定量

小麦粉中のアラビノキシラン量は藤田ら (2010) の方法で測定した. 14 mg の小麦粉のアラビノガラクトランを 50 %エタノールで除去し, 0.4 U mg⁻¹リケナーゼ及び 0.2 U mg⁻¹ β -キシラナーゼを含む酵素溶液 140 μ L を加え, 40 °C で 1 時間 140 rpm で振とう後に 2000 g で 10 分間遠心した. 上清 800 μ L に 2.5 M TFA 1200 μ L を加えて, 105 °C 1 時間処理した後, 70 °C の窒素気流下で濃縮, 乾固させた. これを蒸留水 2 mL に溶解させてアラビノースおよびキシロース量を測定した.

アラビノース量の測定は, サンプル 300 μ L に 0.2 M トリス HCl (pH8.6) 500 μ L,

20 mg ml⁻¹NAD 45 μL, β-ガラクトースデヒドロゲナーゼ 105 mU を加え, 40 °C 1 時間反応させ, 340 nm の吸光度を測定し, ブランクとの差を値として次の計算式よりサンプル中のアラビノース量を算出した.

$$y=18.481x-0.1923$$

ここで, x は測定値, y はサンプル中のアラビノース量を示す. さらに小麦粉乾物重量あたりのアラビノース濃度を計算し, これをアラビノース含量とした.

キシロース量の測定は, D-キシロース測定キット (D-XYLOSE ASSAY KIT, Megazyme) を用いて測定した. サンプル 300 μL に蒸留水 750 μL, 1 M TEA (pH7.5) 200 μL, 5 mg mL⁻¹ NAD+50 mg mL⁻¹ ATP 200 μL, 0.25 mg mL⁻¹, ヘキソキナーゼ 10 μL を加えて 5 分間反応させた後 340 nm の吸光度を測定した. さらにこれに 120 U mL⁻¹ βキシロースデヒドロゲナーゼ, 4.1 mg mL⁻¹ ムターゼ 10 μL を添加し 6 分間反応させた後, 再び 340 nm の吸光度を測定し, 最初に測定した吸光度との差を求めた. キシローススタンダード溶液を用いて同様に測定して求めた検量線から小麦粉乾物重量あたりのキシロース濃度を算出した.

アラビノキシラン含量は小麦粉乾物重量あたりのアラビノース含量とキシロース含量の和として求めた.

7. 損傷デンプン割合の測定

小麦粉中の損傷デンプンは損傷デンプン測定キット (STARCH DAMAGE ASSAY KIT, Megazyme) を用いて測定した. 100 mg の小麦粉に 50 U mL⁻¹ の α-アミラーゼ溶液 1.0 mL を加え, 攪拌後に 40 °C で正確に 10 分間処理した. 酵素反応は 0.2 % (v/v) 希硫酸 8.0 mL を加えて攪拌することによって停止させた. 1000 g で 5 分間遠心後, 上清 0.1 mL を取り, 2 U のアミログルコシダーゼ溶液 0.1 mL を加えて攪拌し, 40 °C で 10 分培養した. これに GOPOD 試薬溶液 4.0 mL を加え, さらに 40 °C で 20 分培養した後, 510 nm の吸光度

を測定した。損傷デンプン割合が既知の小麦粉をスタンダードとして検量線を引き、求めた値から損傷デンプン割合を算出した。

結果

1. 開花期追肥がコムギの品質およびランク区分に及ぼす影響

第 IV-1 表に水田と畑圃場で茎立期追肥量および開花期追肥量を変えて栽培したコムギの品質とランク区分を示した。追肥がコムギの品質に及ぼした影響をみると、茎立期追肥は原粒タンパク質含有率、原粒灰分、容積重、フォーリングナンバーのいずれの項目にも影響を与えなかった（第 IV-1 表）。開花期追肥が多い区では原粒タンパク質含有率が高かったが、開花期追肥は原粒灰分や容積重、フォーリングナンバーには影響を与えなかった（第 IV-1 表）。圃場間の違いをみると、水田に比べて畑では原粒タンパク質含有率が高く、原粒灰分は低く、容積重は重かった。また、いずれの圃場のコムギにおいても、フォーリングナンバーは 300 以上であり、基準を満たしていた（第 IV-1 表）。水田のコムギのランク区分は A から D まで幅広く分布し、A ランクに格付けされたのは茎立期追肥量 2 g m^{-2} 、開花期追肥量 2 g m^{-2} の 1 試験区のみであったのに対して、畑圃場のコムギはすべて A ランクに格付けされた。

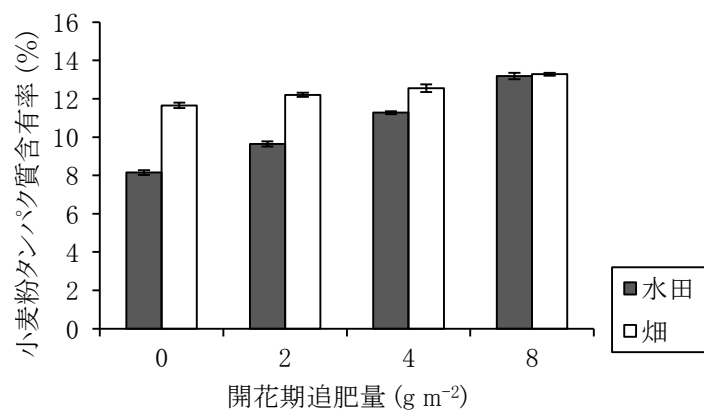
2. 開花期追肥が小麦粉の品質および製パン性に及ぼす影響

小麦粉のタンパク質含有率は開花期追肥量が多い区で高かった（第 IV-1 図）。水田の小麦粉では、開花期追肥量が 0 g m^{-2} のときは 8.2 %であったのに対して、 8 g m^{-2} のときは 13.3 %と 4.9 ポイント高かった（第 IV-1 図）。畑の小麦粉では、開花期追肥量が 0 g m^{-2} のときは 11.7 %であったのに対して、 8 g m^{-2} のときは 13.2 %と 1.5 ポイント高かった（第 IV-1 図）。開花期追肥量が 0 g m^{-2} のときは圃場間の小麦粉タンパク質含有率の差が 3.5 ポイントであったのに対し、開花期追肥量が 8 g m^{-2} のとき小麦粉タンパク質含有

第 IV-1 表 各区の原粒タンパク質含有率と、原粒灰分、容積重、フォーリングナンバー (FN)、ランク区分.

圃場	茎立期 追肥	開花期 追肥	原粒タンパク質 含有率 (%)	原粒灰分 (%)	容積重 (g/L)	FN	ランク区分
水田	0	0	9.1	1.79	830.7	428	D
	0	2	10.4	1.76	838.3	469	D
	0	4	12.4	1.80	830.5	394	C
	0	8	15.3	1.75	821.8	441	C
	2	0	9.0	1.79	832.5	409	B
	2	2	10.2	1.73	839.0	427	A
	2	4	12.3	1.80	833.7	343	B
	2	8	14.3	1.75	825.7	399	B
畑	0	0	12.6	1.56	839.0	413	A
	0	2	13.5	1.54	834.3	443	A
	0	4	14.0	1.58	834.7	473	A
	0	8	14.7	1.57	834.8	463	A
	2	0	12.8	1.57	838.0	458	A
	2	2	13.6	1.53	838.5	407	A
	2	4	13.5	1.52	837.3	432	A
	2	8	14.5	1.56	835.5	361	A
各圃場での 平均		水田 畑	11.6 13.7	1.77 1.55	831.5 836.5	414 431	
各茎立期追肥 量での平均		0 2	12.8 12.5	1.67 1.66	833.0 835.0	441 405	
各開花期追肥 量での平均		0 2 4 8	10.9 11.9 13.0 14.7	1.68 1.64 1.67 1.66	835.0 837.5 834.0 829.5	427 437 411 416	
ANOVA							
茎立期追肥			ns	ns	ns	ns	
開花期追肥			*	ns	ns	ns	
茎立期*出穂期			ns	ns	ns	ns	
圃場〔変量効果〕			*	***	*	ns	

パン及び中華麺用のコムギの原粒品質評価基準を適用した。すなわち、原粒タンパク質含有率の基準値は 11.5~14.0 %，許容値は 10.5~15.5 %，原粒灰分の基準値は 1.75 %以下，許容値は 1.80 %以下，容積重の基準値は 833 g L⁻¹以上，フォーリングナンバーの基準値は 300 以上，許容値は 200 以上。品質評価項目の基準値を 3 つ以上達成し，かつ，許容値を全て達成しているものを A ランク，品質評価項目の基準値を 2 つ達成し，かつ，許容値を全て達成しているものを B ランク，品質評価項目の基準値を 1 つ達成し，かつ，許容値を全て達成しているもの，あるいは品質評価項目の基準値を 2 つ以上達成しているものの，許容値を達成していないものを C ランク，そのほかのものを D ランクとした。*，***はそれぞれ 5 %，0.1 %水準で有意差があることを示す。



第 IV-1 図 開花期追肥量と小麦粉タンパク質含有率の関係.
 図中の棒線は標準誤差を示す (n=2).

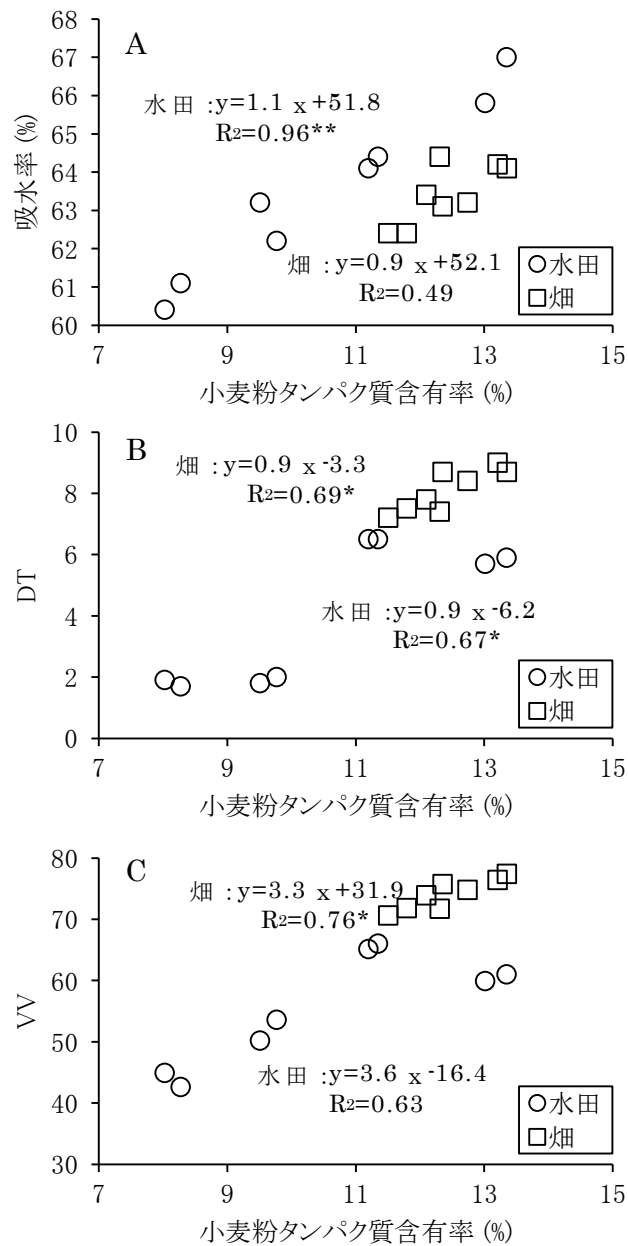
率はいずれの圃場も約 13 %であった (第 IV-1 図)。

小麦粉タンパク質含有率と、ファリノグラムの各値の関係を第 IV-2 図に示した。水田と畑のいずれの小麦粉もファリノグラムの吸水率は小麦粉タンパク質含有率と有意な正の相関があった (第 IV-2 図 A)。しかし、小麦粉タンパク質含有率が同程度のとき、吸水率は水田の方が畑よりも高い傾向がみられた (第 IV-2 図 A)。小麦粉タンパク質含有率と吸水率の回帰直線の傾きは圃場間で有意差はなかったが、切片は水田に比べ畑で有意に大きかった (第 IV-2 図 A)。ファリノグラムの生地形成時間 (DT) はいずれの小麦粉も小麦粉タンパク質含有率と有意な正の相関があった (第 IV-2 図 B)。しかし、DT は小麦粉タンパク質含有率が約 13 %で等しくても、水田が畑よりも小さくなった (第 IV-2 図 B)。ファリノグラムのバリロメーターバリュウ (VV) は小麦粉タンパク質含有率と有意な正の相関があった (第 IV-2 図 C)。VV は小麦粉タンパク質含有率が約 13 %で等しくても、水田で畑よりも小さくなった (第 IV-2 図 C)。

これらの小麦粉で作製したパンの比容積は、小麦粉タンパク質含有率と有意な正の相関関係があり、回帰直線の傾きと切片には圃場間に違いはなかった (第 IV-3 図)。パンの柔らかさの指標であるコンプレッションはいずれの小麦粉も比容積と有意な負の相関があった (第 IV-4 図)。比容積とコンプレッションの回帰直線の傾きは圃場間で有意差はなかったが、切片は水田に比べ畑で有意に大きかった (第 IV-4 図)。

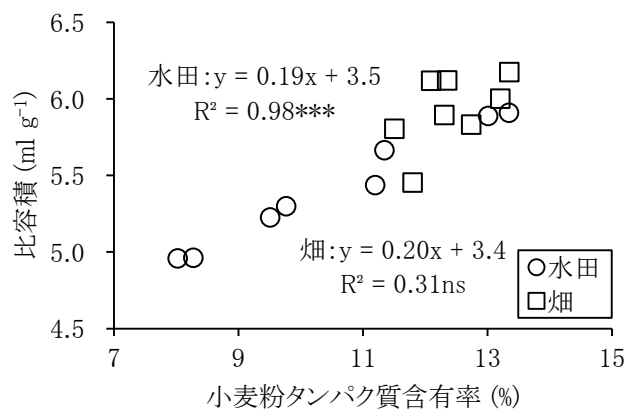
3. 開花期追肥が小麦粉のタンパク質組成、損傷デンプン割合、アラビノキシラン量に及ぼす影響

小麦粉中のグルテンを構成するグルテニンのうち特に製パン性に大きく貢献することが知られている高分子量グルテニンサブユニットの大部分が存在する SDS 不溶性の高分子量画分 (UPP 画分)、グルテンを構成するもう一つのタンパク質であるグリアジンの大



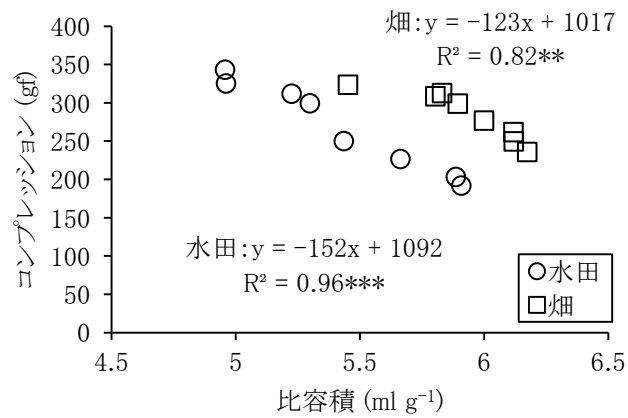
第 IV-2 図 小麦粉タンパク質含有率とファリノグラムの吸水率 (A), 生地形成時間(DT) (B), バロリメーターバリュウ (VV)(C) の関係。

図中の式は圃場ごとの回帰直線と決定係数を示す。*, **, ***はそれぞれ 5 %, 1 %, 0.1 %水準で回帰式が有意であることを示す。A 図中の回帰直線の傾きの圃場間差は 5 %水準で有意差はなく, 切片の圃場間差は 0.1 %水準で有意差があった。



第 IV-3 図 小麦粉タンパク質含有率とパン比容積の関係。

図中の式は圃場ごとの回帰直線と決定係数を示す。***は 0.1 %水準で回帰式が有意であることを，ns は 5 %水準で回帰式が有意でないことを示す。回帰直線の傾きと切片の圃場間差はいずれも 5 %水準で有意ではなかった。



第 IV-4 図 パン比容積とコンプレッションの関係。

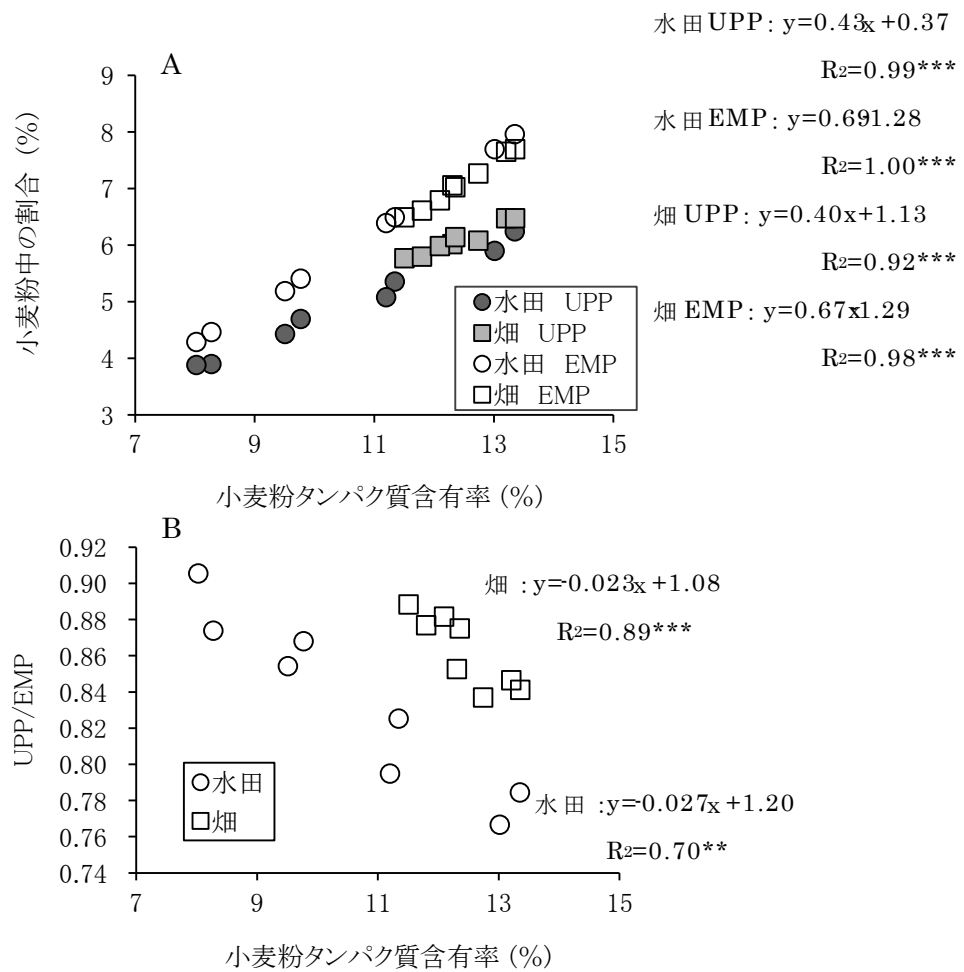
図中の式は圃場ごとの回帰直線と決定係数を示す。**, ***はそれぞれ 1 %, 0.1 %水準で回帰式が有意であることを示す。図中の回帰直線の傾きの圃場間差は 5 %水準で有意差はなく、切片の圃場間差は 0.1 %水準で有意差があった。

分が存在する SDS 可溶性低分子量画分 (EMP 画分) のいずれも両小麦粉でタンパク質含有率と密接な正の相関があった (第 IV-5 図 A). 小麦粉タンパク質含有率と小麦粉中の EMP 画分割合の回帰直線の傾きには圃場間の差は認められなかったが, 切片は水田の方が畑よりも有意に大きかった (第 IV-5 図 A). 小麦粉タンパク質含有率と小麦粉中の UPP 画分の回帰直線の傾きには圃場間の差は認められなかったが, 切片は水田よりも畑で有意に大きかった (第 IV-5 図 A). 小麦粉タンパク質含有率と小麦粉中の UPP/EMP 比の間には有意な負の相関関係が, いずれの圃場でも認められ, タンパク質含有率の増加に伴って UPP/EMP 比は減少した (第 IV-5 図 B). 小麦粉タンパク質含有率と小麦粉中の UPP/EMP 比の回帰直線の傾きには圃場間の差は認められなかったが, 切片は水田よりも畑で有意に大きく (第 IV-5 図 B), 水田に比べて畑の方がグリアジンに対する高分子量グルテニンの割合が大きかった.

小麦粉中の UPP/EMP 比と吸水率の間にはいずれの小麦粉も有意な負の関係が認められた (第 IV-6 図 A). 小麦粉中の UPP/EMP 比と吸水率の回帰直線の傾きには圃場間の差は認められなかったが, 切片は水田よりも畑で有意に大きかった (第 IV-6 図 B). 小麦粉中のアラビノキシランの割合と吸水率の間には有意な関係は認められず (第 IV-6 図 B), また, 小麦粉中の損傷デンプンと吸水率の間にも有意な関係は認められなかった (第 IV-6 図 C).

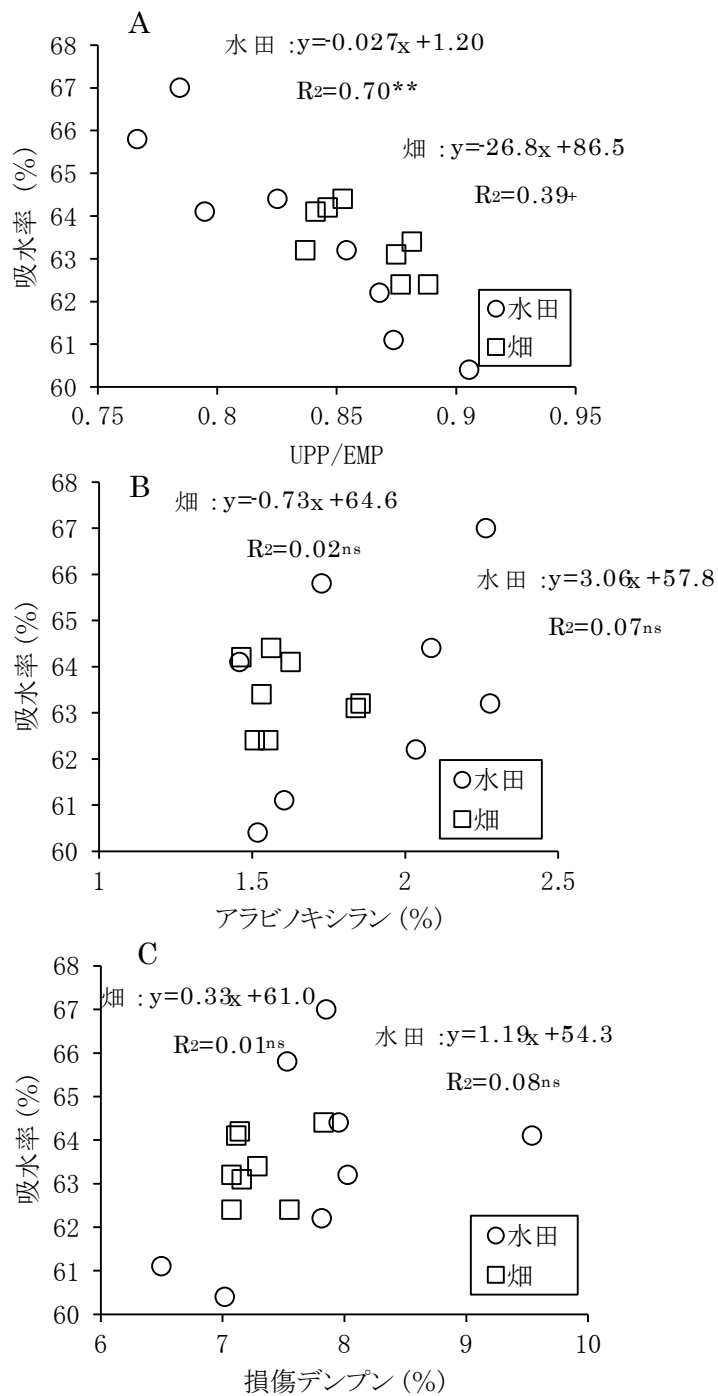
考察

これまでの報告 (佐藤ら 1999, 岩渕ら 2007) と同様に, 開花期追肥は小麦粉タンパク質含有率を高めた (第 IV-1 図). 小麦粉タンパク質含有率が高くなるのに伴い, フェリノグラムの吸水率や DT, VV の値はいずれも大きくなり (第 IV-2 図), より強力粉的な性質を示した. 小麦粉タンパク質含有率が高くなると, パンの比容積も大きくなった (第 IV-3 図) ことから, 開花期追肥によって小麦粉タンパク質含有率を高めることによって, パン用コムギとしての品質を高められることが確認された.



第 IV-5 図 小麦粉タンパク質含有率と小麦粉中に含まれる各画分の割合 (A) と UPP/EMP (B) の関係。

図中の式は圃場ごとの回帰直線と決定係数を示す。**, ***はそれぞれ 1 %, 0.1 %水準で回帰式が有意であることを示す。A 図中の UPP, EMP の回帰直線の傾きの圃場間差はどちらも 5 %水準で有意差はなく、切片の圃場間差はどちらも 0.1 %水準で有意差があった。B 図中の回帰直線の傾きの圃場間差は 5 %水準で有意ではなく、切片の圃場間差は 0.1 %水準で有意差があった。



第 IV-6 図 小麦粉中の UPP/EMP (A), アラビノキシラン (B), 損傷デンプン (C) とファリノグラム吸水率の関係.

図中の式は圃場ごとの回帰直線と決定係数を示す. +, **はそれぞれ 10 %, 1 %水準で回帰式が有意であることを, ns は 5 %水準で回帰式が有意でないことを示す. A 図中の回帰直線の傾きの圃場間差は 5 %水準で有意差はなく, 切片の圃場間差は 5 %水準で有意差があった.

開花期追肥により原粒タンパク質含有率が高くなっても、水田で栽培されたコムギの多くは畑よりも低ランクに格付けされた（第 IV-1 表）。その原因は、原粒タンパク質含有率が基準値内に収まっても、原粒灰分が基準値よりも高かったり、容積重が基準値を下回ったりしたためであった（第 IV-1 表）。さらに、小麦粉タンパク質含有率が約 13 % と高いときには、小麦粉のファリノグラム各値には圃場間で差が認められた（第 IV-2 図）。すなわち、ファリノグラムの吸水率、DT や VV は畑に比べて水田で小さかった（第 IV-2 図）。また、小麦粉中の UPP/EMP 比は水田に比べて畑で有意に高く（第 IV-5 図 B）、小麦粉タンパク質含有率が同じでも、栽培圃場の異なるコムギから得られる小麦粉の品質が異なる可能性が示された。

小麦粉の質は、タンパク質含有率が高いほど、そしてタンパク質画分の割合、特にグリアジンに対するグルテニンの比が大きいほど製パン性が良くなることが報告されている（Uthayakumaran ら 1999, Uthayakumaran and Lukow 2005）。施肥窒素量を増やすことは、小麦粉タンパク質含有率を高めると同時にグリアジンに対するグルテニンの比を小さくする（木村ら 2001）。製パン性は、小麦粉のタンパク質含有率を一定にしてグリアジンに対するグルテニンの比を増やしたとき向上することから（Uthayakumaran ら 1999）、同一品種でタンパク質含有率が同程度であっても製パン性が異なることの要因の一つとして、グリアジンに対するグルテニンの割合の差があると考えられる。本研究では、タンパク質含有率が約 13 % の小麦粉のファリノグラムの各値は水田と畑で異なったこと（第 IV-2 図）には、UPP/EMP 比が水田より畑で大きかったこと（第 IV-5 図 B）が要因の一つである可能性が考えられた。

圃場間の小麦粉品質の差はパン比容積とコンプレッションの関係の圃場間差としても現われた（第 IV-4 図）。同じ比容積のパンで比較すると、水田の方が畑よりもコンプレッションが小さく（第 IV-4 図）、柔らかかった原因として、小麦粉の吸水率の違い（第 IV-2 図 A）が考えられた。畑に比べて水田の小麦粉はタンパク質含有率の割に吸水率が高く

(第 IV-2 図 A), 同じ比容積のパンに含まれる水分も多かったことが考えられた.

小麦粉のタンパク質含有率が高いと吸水率も高くなるが (第 IV-2 図 A, 岩渕ら 2007), タンパク質含有率が同じでも, 吸水率は損傷デンプンの量が異なること (Meredith ら 1966, Sharma and Bains 1974), アラビノキシランの量が異なること (Michniewicz ら 1991, Biliaderis ら 1995), タンパク質の組成が異なること (Ohm ら 2010) が原因で影響を受けることが報告されている. アラビノキシラン (第 IV-6 図 B), 損傷デンプン (第 IV-6 図 C) と吸水率の関係はいずれも有意でなかったのに対して, UPP/EMP 比と吸水率の間には有意な負の相関がみられ (第 IV-6 図 A), 吸水率の圃場間差 (第 IV-2 図 A) には小麦粉中の UPP/EMP 比の違いが関与している可能性が示された. Ohm ら (2010) は, SDS 可溶性のグリアジンを含む分画と吸水率が相関することを示したが, UPP/EMP 比の低い水田の方が畑よりも吸水率が高かった結果 (第 IV-2 図, 第 IV-5 図 B) と一致した.

これらの結果は, 従来栽培環境にはほとんど影響されないとされていたタンパク質含有率以外の小麦粉の品質 (Gupta ら 1994, Takata ら 2000, 岩渕ら 2007, 谷中ら 2011) のうち, グリアジンに対するグルテニンの比が水田と畑で異なり, フェリノグラムの値など小麦粉品質にも影響することを示している. 畑で栽培したコムギの子実は水田に比較して開花前に茎葉に蓄積されて開花後に子実に転流蓄積される窒素の割合が, 開花後に吸収されて子実に蓄積された窒素に比べて多かった (第 III-3 表). しかし, このような子実の窒素の由来によってグリアジンに対するグルテニンの比が影響を受けたという報告は見当たらない. 水田と畑で栽培したコムギのグリアジンに対するグルテニンの比が異なった要因については, 今後さらに検討が必要である.

第 V 章. 総合考察

水田での製パン用コムギ栽培では、収量もさることながら品質が大きな問題となる。本研究は、実需にかなった製パン用コムギを水田で栽培するための基礎的知見を得るために水田、あるいは畑において試験を行った。試験に使用できる水田に限りがあったため、施肥に対する子実タンパク質含有率の応答は圃場によらず同一の傾向があるものとして考え、第 II 章の試験、第 III 章の 2 作期目の試験は畑で行った。

パン用コムギでは、品質が良いとされるには、日本めん用のコムギと比べて子実タンパク質含有率が高いことが必要である。水田と畑で栽培されたコムギを比較すると、水田で栽培されたコムギは畑のコムギよりも子実タンパク質含有率が低いことが多く指摘されている（田野崎ら 1985, 渡邊 2010）。コムギの子実タンパク質含有率を高める技術として、開花期前後の窒素追肥がある（谷口ら 1999, 佐藤 2000, 高山ら 2004, 建部ら 2006, 竹内ら 2006, 佐藤ら 2009, 佐藤ら 2011）。そこで本研究では、まず窒素追肥時期が子実タンパク質含有率に及ぼす影響を検討し（第 II 章）、得られた成果に基づいて水田と畑で栽培したコムギの子実タンパク質含有率が異なる要因と窒素追肥の子実タンパク質含有率増加の相違する要因を検討した（第 III 章）。さらに、水田と畑で栽培したコムギでは小麦粉の品質が異なることが報告されているので、水田と畑で栽培したコムギを用いてタンパク質含有率が同程度のときに品質を調査し、小麦粉の品質が異なる要因を検討した（第 IV 章）。本研究で得られた結果に基づいて、水田における品質の高い製パン用コムギ栽培について考察したい。

1. 水田作コムギの子実タンパク質含有率を高めるための方策

開花期前後の窒素追肥は、収量よりも子実タンパク質含有率を高める効果が高いことを確かめた。開花期前後の窒素追肥の効果は、追肥によって開花後同化乾物重よりも開花後

同化窒素量を増やすことによるものであった（第 II 章）。さらに、水田で栽培したコムギは畑のコムギに比較して子実タンパク質含有率が低いことの要因として、開花前に蓄積され開花後に穂に転流する窒素の量（開花前窒素蓄積量）が水田のコムギでは少ないためであることが分かった。水田で栽培したコムギも、開花期に窒素を施用することによって子実タンパク質含有率が高くなり、開花期追肥を多く施用することによって、畑と同等以上に子実タンパク質含有率を高くすることができることが明らかとなった（第 III 章）。

実際の栽培では、水田作コムギの窒素蓄積には開花期に追肥された窒素を十分に吸収、同化できるか否かも大きく関わる。水田でコムギを栽培するに当たり、畑と第一に異なる条件は、土壌の水分条件であると考えられる。水田におけるコムギ栽培ではしばしば湿害の発生が問題となる（小柳ら 2004）。湿害は土壌の過失により根が低酸素状態に置かれることや、嫌氣的な土壌で硫化水素などの有害物質が発生することなどによって根の機能を低下させ、窒素吸収も低下する（Nakamura ら 2003）。水田でパン用コムギを栽培するためには、畝立てや本暗渠、弾丸暗渠の施工などの排水対策を徹底して、湿害を回避することが、開花期窒素追肥の効果を引き出すのに不可欠である。

2. 水田作コムギの小麦粉の製パン性に関わる要因

小麦粉生地物の物性およびパン比容積においては、環境よりも品種固有の遺伝的性質に強く支配されることが示されている（岩渕ら 2007）。特に、グルテニンの遺伝的な違いがグルテンネットワークの S-S 結合の密度やネットワークの大きさ（分子量）に影響し、結果的に小麦粉生地の強さやパンとしての品質（パン比容積）などに大きく影響すると考えられている（長嶺ら 2002）。中でも、D ゲノムの第一相同染色体の長腕上の *Glu-1* 位置にサブユニット 5+10 をコードする *Glu-D1d* は製パン性を向上させる大きな効果が報告されている（長嶺ら 2002）。

小麦粉中タンパク質のうち、始めにアルブミン-グロブリンタンパク質が蓄積し、開花

後の積算日平均気温が 250°Cd でグリアジンとグルテニンの蓄積が取って代わる (Triboi ら 2003). 植物体の窒素栄養が増えると, グルテニンとグリアジン両方の蓄積の速度と期間は著しく大きくなるが (Triboi ら 2003), グリアジンの方がグルテニンよりも増加量が大きいいため, グリアジンに対するグルテニンの比が低下することが知られている (Doekes ら 1982, Jia ら 1996, Daniel and Triboi 2000, 木村ら 2001, Triboi and Triboi-Blondel 2001). 小麦粉のタンパク質含有率が等しくても, グリアジンに対するグルテニンの比が大きいほど小麦粉生地の強さやパンの比容積は増す (Uthayakumaran ら 1999) ことから, 水田と畑で栽培したコムギの小麦粉の製パン性の違いには, グリアジンに対するグルテニンの比の違いが関与している可能性がある.

水田と畑で栽培したタンパク質含有率が同程度の小麦粉の品質について比較したところ, ファリノグラムの吸水率は水田の方が畑よりも高く, さらに小麦粉タンパク質含有率が約 13% と高いときには, ファリノグラムの DT および VV は畑に比べ水田で低いことが明らかになった. このとき, 小麦粉中の UPP/EMP の比率は水田より畑が高く, これらファリノグラムの各値における水田と畑の差の一因となっていることが示唆された. 同程度の子実タンパク質含有率であっても, 成熟期の穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積窒素量の割合が多い畑で, UPP/EMP 比が大きかったことから, グリアジンに比べグルテニンは開花前蓄積窒素量由来の窒素によって構成されやすい可能性が考えられる. つまり, 水田作コムギの小麦粉の製パン性を向上させるためには, 畑作コムギのように開花期前に吸収同化され開花期後に穂に転流される窒素量を増加させることが重要であることが示唆された.

3. 水田作コムギの製パン性を向上させる方策

最後に, 以上のことを踏まえて実際の水田で製パン性が高いコムギ栽培を考えてみたい. 子実タンパク質含有率を高めるためには, 開花後の窒素追肥が有効であった. 開花後の窒素追肥は, 開花後同化窒素量を増やして子実タンパク質を高めた. 一方, 小麦粉タンパク

質含有率が 13 %程度と高いときの製パン性を水田と畑で比較すると、収穫期の穂窒素蓄積量に占める開花前蓄積量が多い畑の方が水田よりも UPP/EMP 比が大きく、製パン性も良かった。この結果は、製パン性を良くするためにはまず、子実タンパク質含有率を高めることが不可欠であるが、開花後同化窒素量だけでなく、開花前蓄積窒素量の割合も増やすことが必要であると考えられた。開花前蓄積窒素量の割合は、開花期における栄養生長器官の窒素蓄積量と正の相関関係が認められることから (Barbottin ら 2005, Bancal 2009)、開花後だけでなく、生育期間全体を通じて窒素吸収を続ける生育をすることが小麦粉の品質も考慮したコムギ栽培では必要と考えられる。

このような、生育期間全体を通じて窒素吸収を続ける生育をするために、水田におけるコムギ栽培で必要な方策について考えてみたい。まず、ムギの根が健全に発育し、生育期間全体を通じて土壌や肥料から窒素を吸収できる環境を整えることが必要である。そのためには、周囲明渠や本暗渠、弾丸暗渠などの施工を行うことで圃場排水性を高めること、根域が広がるように土壌の砕土率を高めることが必要である。次に、コムギが必要とする窒素量が土壌あるいは肥料から供給され続けるためには、地力窒素では補えない窒素量を施肥として施用することが必要である。第 III 章で用いた水田圃場のように、地力窒素が高くない土壌で栽培する場合は、開花期前後の窒素追肥に加えて、茎立期の窒素追肥や、緩効性肥料を基肥に用いることも検討する必要がある。

このように、日本の水田でも製パン性の高いコムギを栽培することが十分可能であることが示された。コムギはイネと異なり、消費者に渡るまでに製粉や加工といった行程が多く存在する。そのため、コムギの自給率が向上するためには、生産現場だけでなく、製粉や加工、消費までがつながることが必要である。品質の良いコムギを安定的に栽培する技術が確立されることが必要であることは言うまでもないが、生産されたコムギを受け入れ、製粉、加工、消費までつながるシステムを構築することが、今後コムギを増産していく上で必要と考える。

謝辞

本論文は2009年から2012年に、農研機構中央農業総合研究センターの関東東海水田輪作研究チーム（2011年3月まで）および、生産体系研究領域（2011年4月以降）で行ったものである。

農研機構中央農業総合研究センター 渡邊好昭 北陸農業研究監には、本研究を実施する端緒を与えられ、圃場試験の設計とデータの解析、論文のとりまとめに関してご指導を頂いた。また、同センター 関東東海水田輪作研究チーム 大下泰生 上席研究員、渡邊和洋 主任研究員、松山宏美 研究員、赤坂舞子 契約研究員には圃場試験の遂行に当たっての多大なるご協力と、研究に関するご助言を頂いた。中央農業総合研究センター 作物開発研究領域 主任研究員 関昌子 主任研究員には、研究の設計から圃場試験の遂行、製パン試験、品質測定、論文執筆に至るまで、親切なご指導とご助言を頂いた。

農研機構作物研究所 稲研究領域 近藤始彦 上席研究員、荒井（三王）裕見子 主任研究員には、 ^{15}N を用いた実験の試験計画および分析、データ解析についてご指導、ご協力いただいた。同所 麦研究領域 松中 仁 主任研究員（現在、九州沖縄農業総合研究センター水田作・園芸研究領域 主任研究員）には、製パン試験の方法についてご指導を頂いた。農研機構近畿中国四国農業研究センター 水田作研究領域 谷中美貴子 主任研究員には、小麦粉中のタンパク質の分画定量方法とデータ解析についてご指導を頂いた。農研機構作物研究所 麦研究領域 小田俊介 研究領域長、一ノ瀬靖則 主任研究員、乙部千雅子 上席研究員には、小麦粉の各種品質測定法とデータ解析についてご指導とご助言を頂いた。農研機構中央農業総合研究センター 病虫害研究領域 光永貴之 契約研究員には、統計解析についてご指導を頂いた。同センター 水田利用研究領域 関正裕 上席研究員、細野達夫 主任研究員、中山則和 主任研究員には、論文執筆に関し、ご助言と励ましを頂いた。

同センター 業務第1科 鈴木宗一氏（現在、業務第3科長）、柳田勉氏、中山拓郎氏、

横塚清氏，吉田真樹氏（現在，業務第3科），佐藤和也氏には，圃場の管理，栽培試験の遂行に当たり多大なご協力を頂いた。同センター 関東東海水田輪作研究チーム契約職員の加藤典子氏，有村照美氏，池内安寿子氏，片倉和美氏，吉葉洋子氏には，各種試験，調査に関して多大なるご協力を頂いた。

本論文のとりまとめに当たっては，東京農工大学農学府 平沢 正 教授，同 大川泰一郎 准教授，茨城大学農学部 新田洋司 教授に終始懇切丁寧なご指導を頂いた。ここに記して心から感謝いたします。

最後に，本研究を遂行し，とりまとめるのにあたって惜しめない支え，励ましをくれた夫である，農研機構中央農業総合研究センター 水田利用研究領域 加藤仁 主任研究員と子供たちにこの場を借りて感謝いたします。

引用文献

- Altman, D. W., W. L. McCuistion and W. E. Kronstad 1983. Grain protein percentage, kernel hardness, and grain yield of winter wheat with foliar applied urea. *Agron. J.* 75:87–91.
- Asseng, S. and S. Milroy 2006. Simulation of environmental and genetic effects on grain protein concentration in wheat. *Europ. J. Agron.* 25:119–128.
- Barbottin, A., C. Lecomte, C. Bouchard, M. H. Jeuffroy, 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environmental effects. *Crop Sci.* 45: 1141–1150.
- Bancal, P. 2009. Decoupling source and sink determinism of nitrogen remobilization during grain filling in wheat. *Ann. Bot.* 103:1315–1324.
- Biliaderis, C. G., M. S. Izydorczyk and O. Rattan 1995. Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours. *Food Chem.* 53:165–171.
- Cassman, K. G., D. C. Bryant, A. E. Fulton and L. F. Jackson 1992. Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat. *Crop Sci.* 32:1251–1258.
- Daniel, C. and E. Triboni 2000. Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: effects on gliadin content and composition. *J. Cereal Sci.* 32:45–56.
- Doekes, G. J. and L. M. J. Wennekes 1982. Effect of nitrogen fertilization on quality and composition of wheat flour protein. *Cereal Chem.* 59:276–278.
- 江口久夫・平野寿助・吉田博哉 1969. 暖地における小麦の良質化栽培に関する研究 (第2報) 3要素施肥量および窒素の施用時期・施用法と品質との関係. 中国農業試験場報告 A 17:81–111.

Fowler, D. 2003. Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring winter wheat. *Agron. J.* 95:260–265.

藤田雅也・八田浩一・一ノ瀬靖則・小田俊介・久保堅司・松中仁 2010. 北海道コムギ品種「きたほなみ」を遺伝資源とした暖地コムギへの高製粉性の導入. *育種学研究* 12:140–143.

Gupta, R. B., K. Khan and F. MacRitchie 1993. Biochemical basis of flour properties in bread wheats. I. Effects of variation in the quality and size distribution of polymeric protein. *J. Cereal Sci.* 18:23–41.

Gupta, R. B., and F. MacRitchie 1994. Allelic variation at glutenin subunit and gliadin loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1 of bread wheats: Biochemical basis of the allelic effects on dough properties. *J. Cereal Sci.* 18:23-41.

池田達哉 2010. 小麦粉の加工適性とグルテンタンパク質組成の関連と高品質な品種開発. *農林水産技術研究ジャーナル* 33 (11):9–14.

岩渕哲也・田中浩平 2005. 出穂後窒素追肥が硬質コムギ「ミナミノカオリ」の製パン適性に及ぼす影響. *日作九支報* 71:23–24.

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,生地物性および製パン適性に及ぼす影響. *日作紀* 76:37–44.

Jia, Y., V. Masbou, T. Aussenac, J. Fabre and P. Debaeke 1996. Effect of nitrogen fertilization and maturation conditions on protein aggregates and on the breadmaking quality of Soissons, a common wheat cultivar. *Cereal Chem.* 73:123–130.

河野隆・福田弥生・三田村剛・泉澤直・友常年江・小川吉雄 1997. 黒ボク畑土壌における小麦粗タンパク含量の低減対策. *茨城農研報* 4:17-25.

- Kibite, S. and L. Evans 1984. Cause of negative correlations between grain yield and grain protein concentration in common wheat. *Euphytica* 33:801–810.
- 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.
- 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.
- Labraña, X. and J. L. Araus 1991. Effect of foliar applications of silver nitrate and ear removal on carbon dioxide assimilation in wheat flag leaves during grain-filling. *Field Crops Res.* 28:149–162.
- Loffler, C. M., T. L. Rauch and R. H. Busch 1985. Grain and plant protein relationships in hard red spring wheat. *Crop Sci.* 25:521–524.
- Makino, A., T. Mae and K. Ohira 1988. Differences between wheat and rice in the enzymic properties of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the relationship to photosynthetic gas exchange. *Planta* 174:30–38.
- Maruyama-Funatsuki, W.M., K.Takata, T. Tabiki, M. Ito, Z. Nishio, H. Funatsuki and H. Yamauchi 2006. A specific combination of HMW and LMW glutenin subunits results in Extra-Strong dough properties. *Gluten Proteins 2006: 1-5*, AACC International press.
- Meredith, P. 1966. Dependence of water absorption of wheat flour on protein content and degree of starch granule damage. *N. Z. J. Sci.* 9:324–330.
- Michniewicz, J., C. G. Biliaderis and W. Bushuk 1991. Effect of added pentosans on some physical and technological characteristics of dough and gluten. *Cereal Chem.* 68:252–258.
- 長嶺敬・池田達哉・石川直幸 2002. 小麦の高品質化育種のためのタンパク質組成の改良.

- 農及園 77:37-44.
- 長野県 2009. <http://www.alps.pref.nagano.lg.jp/hukyu/09-1/091h01.pdf>
- Nakamura, E., T. Ookawa, K. Ishihara, T. Hirasawa 2003. Effects of soil moisture depletion for one month before flowering on dry matter production and ecophysiological characteristics of wheat plants in wet soil during grain filling. *Plant Prod. Sci.* 6:195-205.
- Nakano, H., S. Morita, O. Kusuda 2008. Effect of nitrogen application rate and timing on grain yield and protein content of bread wheat cultivar 'Minaminokaori'. *Plant Prod. Sci.* 11:151-157.
- 中辻敏朗 2003. 出穂期の窒素追肥によるコムギ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.
- 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. *山口農技研報* 1:56-70.
- 中司祐典・木村晃司 2011. 小麦「ニシノカオリ」における赤かび病防除同時尿素葉面散布. *山口農技研報* 2:37-41.
- 新良力也・西宗昭 1998. 北海道における秋まき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.
- 農業研究センター 1986. 小麦調査基準 第1版. 農業研究センター, つくば. 1-74.
- 農林水産技術会議事務局 1968. 小麦品質検定方法—小麦育種試験における—, 東京. 1-70.
- 農林水産省編 2012 食料・農業・農村白書 平成24年版. 農林統計協会, 東京. 1-386.
- 農林水産統計 2013.
- http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html

- Ohm, J. B., G. Hareland, S. Simsek, B. Seabourn, E. Maghirang and F. Dowell 2010. Molecular Weight Distribution of Proteins in Hard Red Spring Wheat: Relationship to Quality Parameters and Intrasample Uniformity. *Cereal Chem.* 87:553–560.
- Oscarson, P. 1996. Transport of recently assimilated ^{15}N nitrogen to individual spikelets in spring wheat grown in culture solution. *Ann. Bot.* 78: 479–488.
- 乙部 (桐渕) 千雅子・関昌子・松中仁・吉岡藤治・藤田雅也・柳澤貴司・吉田久. 2009. 製パン適性をもつ温暖地向け硬質小麦新品種「ユメシホウ」の育成. *作物研報* 10:75–88.
- Plaut, Z., M. L. Mayoral, L. Reinhold 1987. Effect of altered sink-source ratio on photosynthetic metabolism of source leaves. *Plant Physiol.* 85:786–791.
- Rawluk, C. D. L., G. J. Racz and C. A. Grant 2000. Uptake of foliar or soil application of ^{15}N -labelled urea soppution at anthesis and its affect on wheat grain yield and protein. *Can. J. Plant Sci.* 80:331–334.
- 佐藤暁子・小柳敦史・末永一博・渡辺修・川口數美・江口久夫 1987. コムギ品質におよぼす土壤, 施肥の影響. *日作関東支報* 2:47–78.
- 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・小柳敦史・末永一博・渡辺修・川口數美・江口久夫 1992. コムギ品質におよぼす土壤と窒素,リン酸施肥の影響. *日作紀* 61:616–622.
- 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.
- 佐藤一弘 2000 土壤診断・栄養診断に基づく小麦の高品質・安定栽培技術 *土肥誌* 71:254-258.
- 佐藤導謙・土屋俊雄 2004. 北海道中央部における春播コムギの初冬播栽培に関する研究—窒素用法が製パン品質に及ぼす影響—. *日作紀* 73:282–286.

- 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.
- 佐藤三佳子・五十嵐俊成・櫻井道彦・奥村正敏・鈴木和織・柳原哲司 2011. 穂揃期の生育診断による春まきコムギの子実タンパク質含有率の推定. 日作紀 80:90-95.
- Selles, F. and R. Zenter 2001. Grain protein as a post-harvest index of N sufficiency for hard red spring wheat in the semiarid prairies. *Can. J. Plant Sci.* 81:631-636.
- Sharma, H. and G. S. Bains 1974. Damaged starch contents of wheat whole meals in relation to maltose values and water absorption. *Starke* 26:378-382.
- Shewry, P. R., R. D'Ovidio, D. Lafiandra, J. A. Jenkins, E. N. C. Mills and F. Békés 2009. Chapter 8: Wheat grain proteins. Khan, K. and Shewry, P. ed. *Wheat: Chemistry and technology*, 4th ed. AACC International, Inc. St. Paul, Minnesota. 223-298.
- Tabiki, T., S. Ikeguchi and T. M. Ikeda 2006. Effects of high-molecular-weight and low-molecular-weight glutenin subunit alleles on common wheat flour quality. *Breed. Sci.* 56:131-136.
- 田引正・西尾善太・伊藤美環子 2011. 超強力秋まき小麦新品種「ゆめちから」の育成. 北農研報 195:1-12.
- Takata, K., H. Yamauchi, Z. Nishio and T. Kuwabara 2000. Effect of high molecular weight glutenin subunits on bread-making quality using near-isogenic lines. *Breed. Sci.* 50:303-308.
- 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.

- 武井真理・池田彰弘 2004. コムギのタンパク質含量適性化のための全量基肥施用技術. 愛知農総試研報 36:1-6.
- 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.
- 田中康夫・松本博 1991. 製パンの科学 I 製パンプロセスの科学. 光琳, 東京. 11-26.
- 田中康夫・平春枝・豊島英親・内藤博文 1983. 国内産小麦の製パン適性に関する研究.(第3報) 水田作および畑作小麦の製パン適性評価. 食総研報 43:101-108.
- 田中浩平・宮崎真行・内川修 2008. 肥効調節型肥料を利用した小麦の省力追肥法. 日作九支報 74:36-38.
- 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.
- 田野崎真吾・北原操一・谷口義則 1985. 東北地域における小麦の品質 第1報 普通畑小麦と転換畑小麦との品質の差異. 日作東北支部報 28:95-96.
- 建部雅子・岡崎圭毅・唐澤敏彦・渡辺治郎・大下泰生・辻博之 2006. パン用秋まきコムギ「キタノカオリ」の収量,タンパク質含有率を高める窒素施肥法. 土肥誌 77:273-281.
- 田谷省三 2001. 西日本地域における小麦蛋白質含量の現状と改善方策. 農業技術 56:498-505.
- 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.
- Triboi, E. and A. Triboi-Blondel 2001. Environmental effects on wheat grain growth and composition. Aspects of Applied Biology 64:91-101.

- Triboi, E. and A. Triboi–Blondel 2002. Productivity and grain of seed composition: a new approach to an old problem – invited paper. *Europ. J. Agron.* 16:163–186.
- Triboi, E., P. Martre and A. Triboi–Blondel 2003. Environmentally–induced changes in protein composition in developing grains of wheat are related to changes in total protein content. *J. Exp. Bot.* 54:1731–1742.
- Triboi, E., P. Martre, C. Girousse, C. Ravel and A. Triboi–Blondel 2006. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. *Europ. J. Agron.* 25:108–118.
- 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. *日作九支報* 73:16–20.
- 東北農業研究センター 2011.
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/tarc/008518.html
- Uthayakumaran, S., P. W. Gras, F. L. Stoddard and F. Bekes 1999. Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chem.* 76:389–394.
- Uthayakumaran, S. and O. M. Lukow 2005. Improving wheat for bread and tortilla production by manipulating glutenin-to-gliadin ratio. *J. Sci. Food. Agric.* 85:2111–2118.
- 渡邊洋一・渡部隆・二瓶直登・丹治克男・遠藤あかり 2005. 小麦「ゆきちから」の追肥による高品質安定栽培技術. *東北農業研究* 58:53–54.
- 渡邊好昭 2010. 麦の作付体系研究の現状と課題. *農林水産技術研究ジャーナル* 33 (11):30-34.

Yanaka, M., K. Takata, T. M. Ikeda and N. Ishikawa 2007. Effect of the high-molecular-weight glutenin allele, Glu-D1d, on noodle quality of common wheat. *Breeding Sci.* 57:243–248.

谷中美貴子・高田兼則・池田達哉・石川直幸 2011. タンパク質含量がコムギのポリマータンパク質の量と分子量分布に及ぼす影響. *日作紀* 80:77-83.

義平大樹・唐澤敏彦・中司啓二 2006. 北海道で多収を示す秋播性ライコムギにおける起生期の窒素追肥反応:コムギ, ライムギとの比較. *日作紀* 75:472–479.